中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究

杨舒涵 乔顺达 林殿阳 马欲飞

Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy

YANG Shu-han, QIAO Shun-da, LIN Dian-yang, MA Yu-fei

引用本文:
杨舒涵, 乔顺达, 林殿阳, 马欲飞. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. 中国光学, 2023, 16(1): 151−157. doi: 10.37188/CO.2022−0029
YANG Shu-han, QIAO Shun-da, LIN Dian-yang, MA Yu-fei. Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 151-157. doi: 10.37188/CO.2022-0029

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022−0029

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学. 2019, 12(2): 229 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229

12 W高功率高可靠性915 nm半导体激光器设计与制作

Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers

中国光学. 2018, 11(4): 590 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0590

TDLAS直接吸收法测量CO_2的基线选择方法

Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO_2 measurement

中国光学. 2017, 10(4): 455 https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0455

水平腔面发射半导体激光器研究进展

Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers

中国光学. 2017, 10(2): 194 https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0194

锥形半导体激光器研究进展

Progress of tapered semiconductor diode lasers

中国光学. 2019, 12(1): 48 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0048

10kW级直接输出半导体激光熔覆光源的研制与热效应分析

10 kW CW diode laser cladding source and thermal effect

中国光学. 2019, 12(4): 820 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0820

文章编号 2097-1842(2023)01-0151-07

基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究

杨舒涵，乔顺达，林殿阳，马欲飞*
（哈尔滨工业大学 航天学院 可调谐激光技术国家级重点实验室，哈尔滨 150001）

摘要：可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 是近年发展起来的一种激光光谱气体检测技术，相比于常见的电化学、离子导电陶瓷等技术，其具有选择性强、灵敏度高、响应快、可在线测量、抗背景光谱干扰能力强等优点，适用于复杂环境中气体的长期在线检测。氧气 (O_2) 是人类生存环境中的重要气体，O_2 浓度的检测在生产生活各个领域应用广泛、意义重大。基于此，本文采用 TDLAS 技术对空气中的 O_2 进行高灵敏度测量。采用输出波长为 760 nm 的半导体激光器作为光源，直接吸收光谱法获得环境中的氧气浓度为 20.56%，最小检测极限为 5.53×10^{-3}。在波长调制方法中，优化了激光波长调制深度，得到了完整的二次谐波波形，可用于标定氧气浓度。此系统的信噪比为 380.74，最小检测极限约为 540×10^{-6}。本文的传感系统具有良好的 O_2 检测能力，可广泛用于各个领域中的 O_2 浓度检测。

关 键 词：TDLAS；氧气 (O_2) 浓度检测；直接测量；波长调制；半导体激光器
中图分类号：O433.4 **文献标志码：**A **doi：**10.37188/CO.2022-0029

Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy

YANG Shu-han, QIAO Shun-da, LIN Dian-yang, MA Yu-fei*
(*National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150001, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *mayufei@hit.edu.cn*

Abstract: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) is a recently developed laser spectral gas detection technology. Compared with common oxygen sensors such as electrochemical devices and ionic conductive ceramics, TDLAS has the advantages of high selectivity and sensitivity, fast response, on-line measurement and strong anti-background spectral interference ability. Oxygen (O_2) is an important gas in habitable environments and is greatly significant to industrial production and human life, and the detection of O_2 concentration is also widely used in these fields. Based on this, we adopt TDLAS technology to carry out

收稿日期：2022-03-01；**修订日期：**2022-03-22
基金项目：国家自然科学基金（No. 62022032, No. 61875047, No. 61505041）；黑龙江省优秀青年科学基金（No. YQ2019F006）；黑龙江省博士后科研启动金（No. LBH-Q18052）；中央高校基本科研业务费专项资金
Supported by the National Outstanding Youth Science Fund of China (No. 62022032), National Natural Science Foundation of China (No. 61875047 and No. 61505041), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (No. YQ2019F006), Financial Grant from the Heilongjiang Province Postdoctoral Foundation (No. LBH-Q18052), Fundamental Research Funds for the Central Universities

high sensitivity measurements of O_2 in air. Using a semiconductor laser with an output wavelength of 760 nm as the light source, the oxygen concentration in the environment is 20.56% by direct absorption spectroscopy, and the minimum detection limit is 5.53×10^{-3}. In the wavelength modulation spectroscopy method, the laser wavelength modulation depth is optimized to obtain a complete second harmonic waveform, which can be used to calibrate the oxygen concentration. The SNR of the system is 380.74, and the minimum detection limit is about 540×10^{-6}. The system realized in this paper has good oxygen detection ability and can be widely used in various fields of oxygen concentration detection.

Key words: TDLAS; Oxygen (O_2) concentration detection; direct measurement; wavelength modulation; semiconductor laser

1 引 言

氧气 (O_2) 是一种无色无味气体，空气中 O_2 含量约为 21 %，是人类生存不可或缺的条件。在生物医疗领域，高原地区由于海拔高，大气中 O_2 含量和大气压会下降，导致人机体生理功能衰退，出现如头痛、呼吸困难、精神不振等症状，通过对人类呼吸中氧含量和血氧浓度的检测，可以对人体呼吸系统和新陈代谢进行实时监测。O_2 具有极强的助燃性，工业中不仅可以通过控制 O_2 浓度提高燃烧效率，降低污染物排放，更可以保障生产的顺利进行和工人的生命安全。因此，O_2 浓度的检测在工业生产、医疗健康、航天工程等众多领域具有重要意义。

由于物理化学特性不同，不同气体的检测方式也有所不同[1-3]，O_2 检测应用领域广泛，检测方法呈多样化。常见的氧传感器有电化学装置[4]、离子导电陶瓷[5]、荧光猝灭[6] 等。电化学装置和安培电池是最常见的 O_2 检测装置，因其价格低廉应用最为广泛，但其长期与待测物质接触后，会造成探测器腐蚀、响应速度慢、对复杂气体中目标气体的判别力低、灵敏度低等问题[7]，故这些装置不能进行长期在线检测，而光谱检测法更加适用于气体的长期在线检测。

可调谐二极管吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)、非分散红外吸收光谱技术 (Non-Dispersive Infrared, NDI)[8] 以及拉曼光谱技术 (Raman Spectroscopy, RS) 等是常用的多组分气体分析光谱检测技术。近年来，半导体激光器的出现大大降低了激光光谱检测的成本[9-10]，使得可调谐二极管激光吸收光谱检测技术的应用前景更广泛。TDLAS 是一种非侵入式光谱测量技术[11]，克服了色谱和软测量等传统方法的缺点，具有选择性强、灵敏度高、响应快、可在线测量，抗背景光谱干扰能力强等优点[12]，更适用于复杂情况下气体浓度的在线检测。2000 年，Schlosser H E 等人[13] 基于 TDLAS 技术进行氧浓度原位检测，实现了 1.6 Hz 时间分辨率的绝对氧浓度测量；2010 年，浙江大学张春晓[14] 采用 TDLAS 直接吸收光谱法对 O_2 浓度进行测量，该方法的最小探测极限可达 0.3 %；2016 年，Gao Y W 等人[15] 开发了一种用于实时氧浓度检测的 TDLAS 分析仪，检测极限可达 0.1 %，可以准确确定氧浓度；2017 年，Zhou X 等人[16] 研制了一种高灵敏检测系统，他们采用立方扩散积分腔增加光程，该系统的检测极限可达 350×10^{-6}。虽然目前有很多 TDLAS 系统，但这些 TDLAS 系统的检测能力不理想。本文采用 TDLAS 技术对空气中的 O_2 浓度进行高灵敏度测量，首先根据直接测量法计算得到空气中 O_2 浓度，并采用波长调制法进一步提高系统的灵敏度，最终得到 ppm 量级的检测极限，可满足多个领域的应用需求。

2 测量原理

TDLAS 技术主要分为直接吸收光谱技术 (Direct Absorption, DA) 和波长调制光谱技术 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)[17]。直接吸收光谱技术通过测量光谱吸收率信号[18]，常用于气体浓度的反演。其工作原理为通过改变激光器的工作温度和电流，控制其输出波长范围，从而获得一段有完整吸收峰的吸收谱线。在此基础上，通过计算吸光度曲线在频域上的积分值，结

合气体浓度计算式可直接得到气体浓度。根据 Beer-Lambert 定律[19], 当一束激光穿过介质时, 其强度将发生变化, 有

$$I_t(v) = I_0(v)\exp(-\alpha_v) = I_0(v)\exp[-S(T)PXL\phi(v)] \quad , \qquad (1)$$

式中, v 为入射激光频率; $I_0(v)$ 为入射光强; $I_t(v)$ 为出射光强; α_v 为吸收系数; $S(T)$ 为待测气体特征谱线线强, 代表该谱线的吸收强度; P 为气体介质的压强; X 为待测气体浓度; L 代表吸收光程, $\Phi(v)$ 为归一化线型函数, 代表吸收谱线的形状, 与温度、压力和气体的组成成分有关。实际测量中气体的吸收线型主要由多普勒加宽和碰撞加宽共同决定, 无论是何种线型, 其对频域的积分始终为 1, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty}\phi(v)\mathrm{d}v = 1 \quad . \qquad (2)$$

谱线的线强$S'(T)$可以通过 HITRAN 数据库进行计算, 单位为 [$\mathrm{cm^{-1}/(molecule\times cm^{-2})}$], 通过以下公式可换算得到 Beer-Lambert 定律中所使用的 $S(T)$, 单位为 [$\mathrm{cm^{-2}atm^{-1}}$][14]:

$$S(T) = S'(T)\times\frac{7.34\times10^{21}}{T[k]} \quad . \qquad (3)$$

对公式 (1) 两端进行对数运算后, 在整个频域积分可得到:

$$PXS(T)L = \int_{-\infty}^{\infty}-\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right)\mathrm{d}v = A \quad . \qquad (4)$$

气体的浓度值可以通过公式直接得到:

$$X = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}-\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right)\mathrm{d}v}{PS(T)L} = \frac{A}{PS(T)L} \quad . \qquad (5)$$

已知大气压 P、线强$S(T)$、吸收光程 L 时, 只要利用衰减之后的光强与入射光强的比值即可得到吸光度曲线。然后, 在频域进行积分运算, 就可以获得气体的浓度值 X。

3　实验部分

3.1　实验装置

TDLAS 测量系统结构如图 1 所示。实验中采用 Wavelength Electronics 公司 LD2TC5 LAB 系列组合激光二极管和温度控制器对激光器波长进行调制。在直接吸收测量过程中, 将由信号发生器产生的低频锯齿波加在激光控制器上, 控制激光器的扫描电流, 激光源是输出波长为 760 nm 的半导体激光器(型号为 EP760-DM-TP39), 出射光经过焦距 f 为 50 mm 的 CaF_2 透镜进行准直, 准直后的激光束在空气中传输并照射到光电探测器的光敏面上, 经示波器进行实时波形检测, 最终获得具有 O_2 吸收的原始光谱信号。在波长调制测量过程中, 由信号发生器产生高频正弦波叠加在低频锯齿波上作为波长调制, 同样经过焦距 f 为 50 mm 的 CaF_2 透镜进行准直, 准直后的激光束在空气中传输并照射到光电探测器的光敏面上, 经锁相放大器进行解调, 最终获得完整的二次谐波图形。

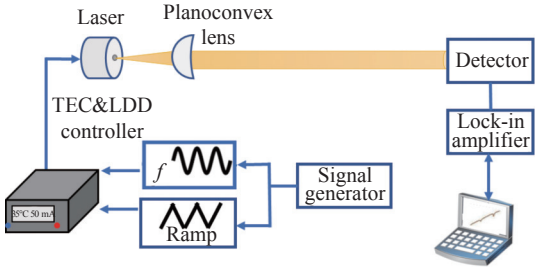

图 1　TDLAS 测量系统结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of TDLAS measurement system

3.2　实验方案

为提高 TDLAS 检测系统的信号强度, 要对 O_2 吸收线进行优化选择。根据光谱传感谱线选择原则: 实验中所选激光谱线应具有较强的吸收强度; 在谱线附近只存在 O_2 吸收线, 不存在其他气体干扰; 该谱线应在市面上可获得的激光光源输出波段内。根据 HITRAN2020 数据库, 对空气中主要成分(氮气、二氧化碳、氧气、水)的吸收光谱进行仿真分析。

如图 2(a)(彩图见期刊电子版) 所示, 在 13 100 $\mathrm{cm^{-1}}$ 附近区域内只存在 O_2 吸收线, 不存在其他吸收线干扰, 这可以确保实验测得的吸收峰为 O_2 吸收峰。O_2 在 760 nm左右存在大量吸收线, 如图 2(b)(彩图见期刊电子版) 所示。在本实验中, 选择的波长为 760.77 nm (13 144.54 $\mathrm{cm^{-1}}$) 的吸收谱线。该吸收线线强较强, 可以较大限度地提高 TDLAS 信号。实验所用激光器为半导体激光器, 该激光器输出功率随电流的变化曲线如图 3(彩图见期刊电子版) 所示, 输出功率最大可达 18 mW, 可以稳定输出波长为 760 nm 左右的单模高斯光束。实验中激光器的工作温度设为 35 °C, 保证激

光器发射波长在覆盖吸收线的同时又具有较大的输出功率。

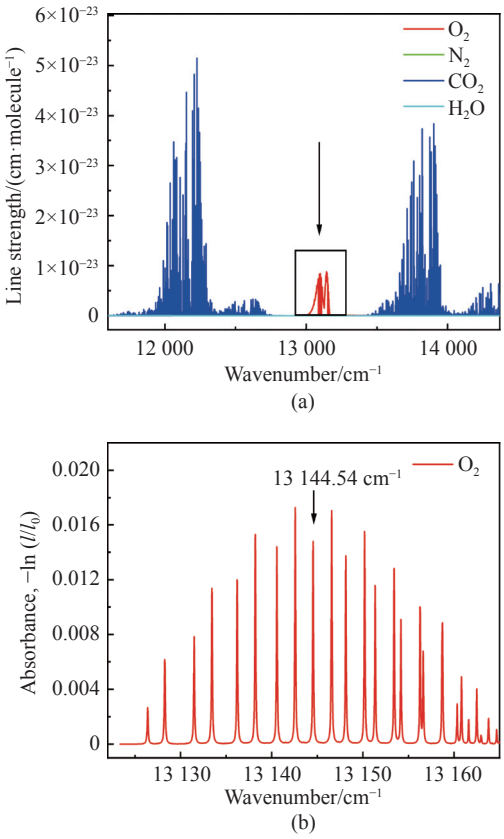

图 2 基于 HITRAN2020 数据库仿真的 O_2 吸收谱线

Fig. 2 O_2 absorption line based on the HITRAN2020 database

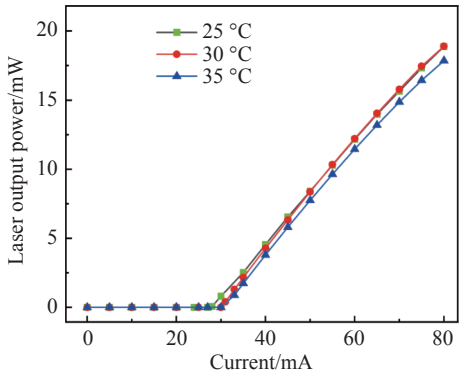

图 3 激光器输出功率与电流关系曲线

Fig. 3 Relationship between laser output power and the injected current

4 结果讨论与分析

4.1 直接吸收法

利用扫描波长直接吸收技术对气压为 99.5 kPa、温度为 291 K 的实验环境中的 O_2 进行测量，由信号发生器产生的低频锯齿波控制激光器扫描电流为 45~75 mA。为了提高传感器的性能，采用 Savitzky-Golay (S-G) 滤波算法降噪，S-G 滤波算法本质上采用了局部建模，即一种基于时域局部多项式最小二乘拟合的滤波方法。通过设置拟合阶数 (order) 和窗口长度 (window length) 两个参数控制平滑滤波，使其效果达到最好。首先选取窗口长度为 20 点，阶数分别为 2、3、4、5 进行平滑滤波，结果如图 4(彩图见期刊电子版) 所示，4 阶和 5 阶滤波可以在保证吸收峰形状不发生改变的同时对无吸收处的噪声进行滤除。选取拟合阶数为 5，窗口长度分别为 10、20、30、40、50 点进行平滑滤波处理，结果如图 5(彩图见期刊电子版) 所示，可见窗口长度为 20 点时滤波效果更好。因此，本实验采用拟合阶数为 5，窗口长度为 20 的 S-G 滤波对原始信号进行平滑滤波，对无吸收段光强进行多项式拟合，确定入射光光强基线，如图 6(彩图见期刊电子版) 所示。图中从左到右

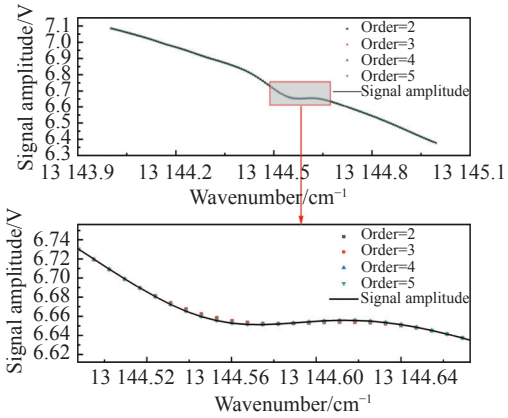

图 4 不同拟合阶数时 S-G 滤波结果

Fig. 4 S-G filtering results for different orders

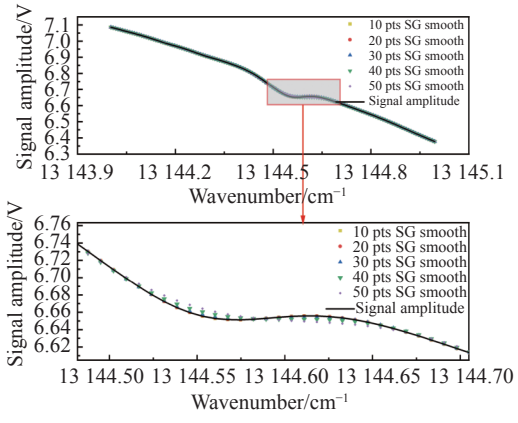

图 5 不同窗口长度时 S-G 滤波结果

Fig. 5 S-G filtering results for different window lengths

对应的吸收峰依次为 13 144.5 cm^{-1}, 13 146.6 cm^{-1}, 13 148.1 cm^{-1}。选择 66~72 mA 扫描电流处的吸收峰(如图 7(a) 所示)进行分析, 对应激光器输出中心波数为 13 144.5 cm^{-1}, 再对透射光 I_t 与入射光 I_0 的比值进行对数运算, 进行 Lorentz 拟合得到吸光度曲线, 如图 7(b) 所示。

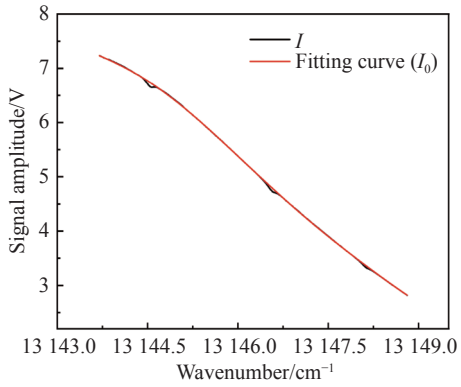

图 6　多项式拟合参考光基线

Fig. 6　The baseline of the reference light fitted by a polynomial

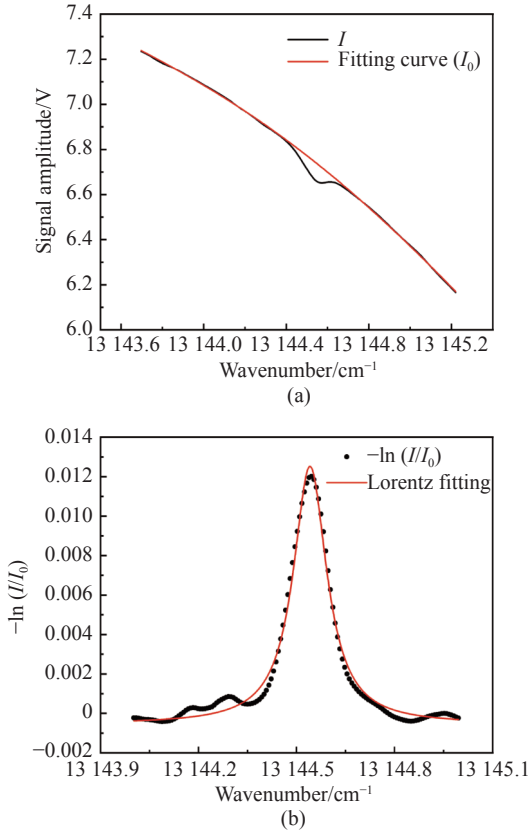

图 7　291 K 温度下空气中 O_2 的吸收光谱图

Fig. 7　Absorption spectra of oxygen in air at 291 K

该条件下线强可根据 HITRAN 数据库算得, $S(T)$为 7.458×10^{-24} [cm^{-1}/(molecule×cm^{-2})], 吸收光程 L 为 50 cm, 算得此时空气中 O_2 浓度为 20.56%。将拟合残差作为噪声, 得到该传感系统最小检测极限为 5.53 ×10^{-3}。

4.2　波长调制技术

由于半导体激光器具有线宽窄、频率调制快等优点, 可以通过注入电流进行波长调制。实验中将频率为 1 kHz 的高频正弦波叠加在低频锯齿波扫描信号上, 驱动激光器的输出波长在吸收谱线附近进行扫描和调制。输出激光经焦距为 50 mm 的 CaF_2 透镜准直后入射到光电探测器光敏面上。光电探测器信号经过锁相放大器进行解调, 得到二次谐波信号 2f 的幅值与气体浓度信号成正比, 由此可反演气体浓度。

不同于直接吸收法可以直接确定气体浓度的绝对值, 波长调制法中二次谐波信号峰值与波长调制幅度有关。为了得到最大二次谐波信号峰值, 先测量其最佳调制深度, 如图 8 所示。当调制深度为 1.92 mA 时, TDLAS 系统获得了最大的二次谐波信号 2f, 如图 9 所示。取二次谐波侧翼标准差作为噪声, 计算得到该 TDLAS 传感系统信

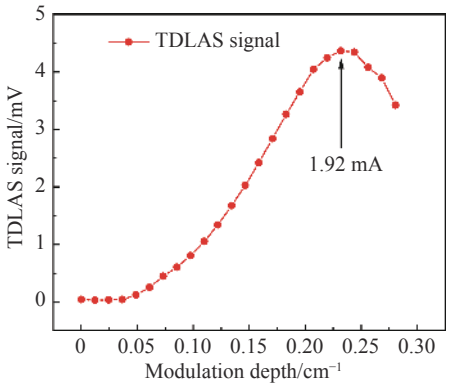

图 8　TDLAS 系统信号幅值随调制深度的变化关系

Fig. 8　The variation of the TDLAS signal amplitude with modulation depth

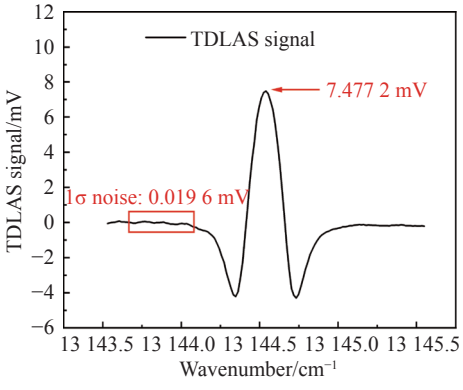

图 9　TDLAS 2f 信号与噪声

Fig. 9　2f signal and noise for the TDLAS system

噪比为 380.74，将信噪比为 1 时的浓度作为系统的检测极限，该 TDLAS 装置测量 O_2 浓度的最小检测极限为 540 $\times 10^{-6}$。

5 结 论

O_2 浓度检测在工业生产、人类生活等各个领域都有重要意义，然而目前报道的基于 TDLAS 技术的 O_2 检测系统灵敏度较低，限制了其应用。本文通过优化选择 O_2 吸收线，首先采用直接测量法获得 O_2 吸光度曲线，计算得到空气中 O_2 浓度为 20.56 %，并用波长调制法优化了调制深度，最终获得了 ppm 量级的优异检测极限。该传感系统在多个领域具有应用潜力。

参考文献：

[1] 隋丽丽, 黄微微, 王平, 等. 原位生长的α-Fe_2O_3/ZnO异质纳米棒阵列对乙醇气体的高选择性检测[J]. 应用化学, 2021, 38(7): 857-865.
SUI L L, HUANG W W, WANG P, *et al*.. *In situ* deposited heterogeneous α-Fe_2O_3/ZnO nanorod arrays for highly selective detection of ethanol[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(7): 857-865. (in Chinese)

[2] 伞晓广, 巩晓辉, 陆一鸣, 等. NiO-WO_3纳米立方块的制备及在甲醛检测中的应用[J]. 应用化学, 2020, 37(10): 1203-1210.
SAN X G, GONG X H, LU Y M, *et al*.. Synthesis of NiO-WO_3 nanocubes and their application in detecting formaldehyde[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2020, 37(10): 1203-1210. (in Chinese)

[3] 李佳祁, 付大友, 王竹青, 等. 基于气液相化学发光技术的臭氧在线检测方法[J]. 应用化学, 2020, 37(1): 96-102.
LI J Q, FU D Y, WANG ZH Q, *et al*.. Online ozone detection method based on gas-liquid phase chemiluminescence technology[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2020, 37(1): 96-102. (in Chinese)

[4] KOCACHE R. The measurement of oxygen on gas mixtures[J]. *Journal of Physics E:Scientific Instruments*, 1986, 19(6): 401-410.

[5] KOCACHE R M A, SWAN J, HOLMAN D F. A miniature rugged and accurate solid electrolyte oxygen sensor[J]. *Journal of Physics E:Scientific Instruments*, 1984, 17(6): 477-482.

[6] MERILÄINEN P T. Sensors for oxygen analysis: paramagnetic, electrochemical, polarographic, and zirconium oxide technologies[J]. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 1989, 23(6): 462-466.

[7] 刘云燕, 潘教青, 程传福, 等. 半导体激光器在氧气探测中的应用及关键技术[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 501-505.
LIU Y Y, PAN J Q, CHENG CH F, *et al*.. Application and key technologies of semiconductor laser in the detection of oxygen[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 501-505. (in Chinese)

[8] 谢耀, 华道柱, 齐宇, 等. GFC-IFC技术在多组分微量气体分析中的应用[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1378-1386.
XIE Y, HUA D ZH, QI Y, *et al*.. Applications of GFC-IFC in trace multi-component gas analysis[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1378-1386. (in Chinese)

[9] MA Y F, HE Y, TONG Y, *et al*.. Quartz-tuning-fork enhanced photothermal spectroscopy for ultra-high sensitive trace gas detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 32103-32110.

[10] MA Y F, LEWICKI R, RAZEGHI M, *et al*.. QEPAS based ppb-level detection of CO and N_2O using a high power CW DFB-QCL[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1008-1019.

[11] 张步强, 许振宇, 刘建国, 等. 基于波长调制技术的激光器调制特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2702-2707.
ZHANG B Q, XU ZH Y, LIU J G, *et al*.. Modulation characteristics of laser based on wavelength modulation technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(9): 2702-2707. (in Chinese)

[12] 钟笠, 宋迪, 焦月, 等. 具有复杂光谱特征的丙烯气体的TDLAS检测技术研究[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1044-1054.
ZHONG L, SONG D, JIAO Y, *et al*.. TDLAS detection of propylene with complex spectral features[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1044-1054. (in Chinese)

[13] SCHLOSSER H E, WOLFROM J, EBERT V, *et al*.. In situ determination of molecular oxygen concentrations in full-scale fire-suppression tests using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2001: 353-360.

[14] 张春晓. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的 O_2 和 CO 气体测量[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 86.
ZHANG CH X. O_2 and CO sensing based on tunable diode laser absorption spectroscopy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 86. (in Chinese)

[15] GAO Y W, ZHANG Y J, CHEN D, *et al*.. Real-time O_2 measurement in a cement kiln with a TDLAS analyzer[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2016, 10155: 101552R.

[16] ZHOU X, YU J, WANG L, *et al*.. Sensitive detection of oxygen using a diffused integrating cavity as a gas absorption cell[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2017, 241: 1076-1081.

[17] 臧益鹏, 聂伟, 许振宇, 等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱的痕量水汽测量[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1130004.
ZANG Y P, NIE W, XU ZH Y, *et al*.. Measurement of trace water vapor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1130004. (in Chinese)

[18] 袁志国, 马修真, 刘晓楠, 等. 利用可调谐激光吸收光谱技术的柴油机排放温度测试研究[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 281-289.
YUAN ZH G, MA X ZH, LIU X N, *et al*.. Testing on diesel engine emission temperature using tunable laser absorption spectroscopy technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 281-289. (in Chinese)

[19] 邓瑶, 唐雯, 李峥辉, 等. 基于直接吸收峰峰值标定的气体浓度反演方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0330002.
DENG Y, TANG W, LI ZH H, *et al*.. Gas concentration inversion method based on calibration of direct absorption peak value[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0330002. (in Chinese)

作者简介:

杨舒涵(1999—), 女, 吉林四平人, 硕士研究生, 2021 于哈尔滨工业大学获得学士学位, 主要研究方向为激光光谱技术。E-mail: yangshuhan@stu.hit.edu.cn

马欲飞(1984—), 男, 教授, 博士, 籍贯甘肃省庆阳市, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 曾在美国莱斯大学进行联合培养, 主要研究方向为激光光谱技术及应用。E-mail: mayufei@hit.edu.cn