



激光与光电子学进展

Laser & Optoelectronics Progress

ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目： 基于电光双光梳光谱的气体浓度测量方法研究
作者： 王杰，刘睿，廖文龙，任心仪，马慧，闫明，曾和平，黄勤清，程林
收稿日期： 2022-08-17
网络首发日期： 2022-11-01
引用格式： 王杰，刘睿，廖文龙，任心仪，马慧，闫明，曾和平，黄勤清，程林. 基于电光双光梳光谱的气体浓度测量方法研究[J/OL]. 激光与光电子学进展. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20221031.1545.044.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于电光双光梳光谱的气体浓度测量方法研究

王杰¹，刘睿¹，廖文龙¹，任心仪^{2*}，马慧²，闫明²，曾和平²，黄勤清³，程林³

¹ 国网四川省电力公司电力科学研究院，四川 成都 610041；

² 华东师范大学重庆研究院，重庆 401121；

³ 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司，湖北 武汉 430074

摘要 双光梳光谱是实现高分辨光谱分析的重要工具。然而，其相干特性依赖于复杂、庞大的频率锁定与反馈系统，因此成本高昂且对环境扰动敏感，应用领域受限。基于电光频率梳的双光梳系统具有装置简单、频率捷变及相干性高等优势，有利于外场应用。但是其在气体检测应用中的浓度反演精度及实时性仍有待验证。为此，本文搭建了高相干电光双光梳系统，并利用多通气体池实现了CO和CO₂气体吸收光谱测量，其结果与HITRAN数据库仿真结果一致。光谱分辨率达200 MHz，单次刷新时间仅4 μs。实验通过对CO₂吸收峰的浓度反演与多峰拟合，将浓度不确定度缩小至2.86%。此外，通过对CO吸收光谱的快速检测，验证了系统对混合气体浓度监测的实时性。该系统有望应用于对电力设备故障特征气体的实时监测。

关键词 分子光谱；电光；频率梳；双光梳光谱；气体检测

中图分类号 O433 **文献标志码** A

Study on electro-optic dual-comb spectroscopy for gas concentration measurement method

Wang Jie¹, Liu Rui¹, Liao Wenlong¹, Ren Xinyi^{2*}, Ma Hui², Yan Ming², Zeng Heping², Huang Qinqing³, Cheng Lin³

¹ Power Science Research Institute of State Grid, Sichuan Electric Power Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;

² Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121, China;

³ Wuhan NARI Co Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Dual-comb spectroscopy is an important tool to achieve high-resolution spectral analysis. However, its coherence depends on the complex and huge frequency-locking and feedback systems, thus the cost is very high and the system is sensitive to environmental disturbance, which makes its application fields limited. The dual-comb system based on electro-optic frequency comb has the advantages of simple device, frequency agility, high coherence and is conducive to the field applications, but the accuracy and real-time performance of concentration inversion in gas detection applications still need to be verified. Therefore, a highly coherent electro-optic dual-comb system was built in this paper. And the absorption spectra of CO and CO₂ were measured by using a multi-pass gas cell, which results

基金项目：国家电网有限公司科技项目资助（52199920002S）

作者简介：王杰（1978—），男，工程师。研究方向：激光光谱技术。E-mail: wjah2007@163.com

***通信作者：**任心仪（1995—），女，博士后。研究方向：激光光谱技术。*E-mail:

18717827913@163.com

were consistent with the simulation data of HITRAN database. The spectral resolution reached 200 MHz and the single refresh time was only 4 μ s. The concentration uncertainty of CO₂ absorption peaks was reduced to 2.86% by concentration inversion and multi-peak fitting. In addition, the real-time performance of the system for the concentration monitoring of mixed gas is verified through the rapid detection of CO absorption spectrum. The system is expected to be applied to real-time monitoring of fault characteristic gases of power equipment.

Key words molecular spectroscopy; electro-optic; frequency comb; dual-comb spectroscopy; gas detection

OCIS codes 300.6390; 120.0280; 280.4788

1 引言

光学频率梳（简称光梳）作为一种相干光源，其在时间域表现为载波包络相位稳定的超短脉冲序列，而在频率域则为等间距分布的窄线宽频率梳齿。光梳技术促进了精密光谱测量领域的发展，其中双光梳光谱(DCS)技术发展迅猛。它利用两台重复频率略有差别的光梳在高速光电探测器上进行光外差探测的方式，可在无需机械扫描与色散元件的情况下，实现宽带高分辨分子光谱的快速测量。因此，DCS被广泛应用于大气遥感、痕量分析、工业气体监测等领域^[1-7]。近十年，光纤光源技术的发展拓展了DCS外场应用领域^[6]。2019年，G. Ycas等人利用基于光纤光梳的DCS系统实现了1 km范围内的气体遥感，对油田区域天然气挥发物含量进行实时监测，探测灵敏度达亚ppb（十亿分之一）量级^[7]。

另一方面，变压器电力设备故障特征气体（如甲烷、乙炔、一氧化碳、二氧化碳等）的快速检测是光谱技术一个重要应用领域，对变压器等电力设备故障诊断以及运行状态评价至关重要^[8-10]。然而，现有电力设备故障气体检测方法如气相色谱法^[11-13]，或傅里叶红外光谱法^[14]等，存在单点采样、检测时间滞后，或光谱分辨率有限（受限于扫描臂长度）、测量时间长等问题。DCS能够有效避免上述问题，因此有望为电力故障特征气体的高分辨、实时检测提供新途径。

然而，基于锁模原理的光纤光梳对环境（温度、振动）敏感，需要复杂的稳频锁相系统来保持高相干性^[15-17]，因此增加了系统复杂度与成本。基于铌酸锂波导调制器的电光(EO)光梳技术为经济实用型DCS系统提供了新方法^[18-26]。在电光光梳DCS(EODCS)测量中，两台电光梳的中心频率溯源至同一个稳频连续光源，因此无需额外的锁频系统，即可具备高相干性与抗干扰能力，更适用于外场环境。目前，EODCS研究主要集中于高分辨光谱测量。例如，2016年，G. Millot等人报道了基于单强度调制器的近红外EODCS系统，验证了其高分辨

率、高频谱精度及快速测量的优势^[20]。2017年, M. Yan 等人在此基础上采用非线性差频技术实现了乙烯、甲烷气体中红外光谱的高分辨测量^[21]。2018年, S. Wang 等人利用准整数倍重频关系的 E0 光梳, 实现了光学分辨率达 1MHz 的超高分辨透射光谱测量^[22]。然而在气体检测应用方面, EODCS 在气体浓度反演分析中的测量精度及实时性仍有待验证。

为此, 本文基于 EODCS 技术研制了一种简单实用的气体传感系统, 并针对 CO 与 CO₂ 两种特征气体开展了多特征峰快速测量与气体浓度反演研究。系统采用了基于单强度调制器的光梳产生方式, 极大地降低了成本与复杂度, 并利用多通气体腔结构, 增加了光谱的有效光程。实验表明, 系统能够实现气体浓度的精确分析与实时监测。实验中, 同一气压下浓度的相对不确定度为 2.86%, 且单次成谱时间仅为 4 μs, 有望应用于电力设备故障气体的快速检测。

2 基本原理

2.1 双光梳光谱技术

这里的电光梳是由对单频光的低频强度调制产生。调制后, 在单频光频率 f_{CW} 两侧产生新的频率边带, 且边带间隔与调制频率一致。如图 1 所示, 电光梳 1 作为信号光梳, 其重复频率为 f_r , 电光梳 2 作为本振光梳, 其重复频率为 $f_r + \Delta f$, 其中 Δf 为两台电光梳的重复频率差。 f_{AOM} 为电光梳 2 的光频偏置频率。双光梳的电场表达式分别为:

$$E_{n1} = A \cos[2\pi(f_{CW} + nf_r)t], \quad (1)$$

$$E_{n2} = A \cos\{2\pi[f_{CW} + n(f_r + \Delta f) - f_{AOM}]t\}, \quad (2)$$

该式中, A 为电场振幅, n 为整数, 表示梳齿编号。双光梳拍频后, 每个梳齿对应的光电流 I_n 可表示为:

$$I_n \propto \cos[2\pi(f_{AOM} + n\Delta f)t], \quad (3)$$

经过光外差探测, 梳齿的光频信息被一一映射至射频域, 其梳齿表达式为:

$$f_n = f_{AOM} + n\Delta f, \quad (4)$$

即, 射频梳齿的中心频率为 f_{AOM} , 梳齿间隔为重复频率差 Δf , 对应时域干涉信号的周期为 T , $T = 1/\Delta f$ 。当信号光梳经过待测气体时, 其梳齿强度被气体吸收线型调制。拍频

后,光频与气体相互作用的信息被转换到射频域,采用光电探测器和数据采集卡记录射频频谱,并反射至光频,即可以获得光频吸收光谱信息,实现分子光谱的测量。

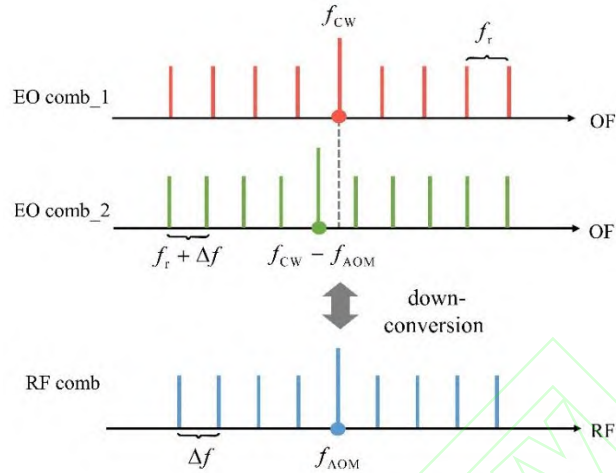


图1 EODCS的频域多外差探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multiheterodyne detection in frequency domain of EODCS

2.2 浓度测量原理

气体浓度测量基于朗伯比尔定律。当一束波数为 ν 、强度为 $I_0(\nu)$ 的单色光穿过气体分子时,透射光光强由于吸收而衰减至 $I(\nu)$,则透射率 T_ν 表达式为:

$$T_\nu = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = \exp[-\alpha(\nu) \cdot N \cdot L], \quad (5)$$

式中, $\alpha(\nu)$ 表示为吸收系数, N 和 L 分别为气体分子数密度以及吸收长度。在吸收峰对应的波数范围内 $[\nu_1, \nu_2]$,对吸收系数 $\alpha(\nu)$ 求定积分即对应该吸收峰的线强度 S 。可表示为:

$$S = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \alpha(\nu) d\nu, \quad (6)$$

结合(5)式与(6)式,可得到分子数密度 N 的表达式为:

$$N = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \ln \left[\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \right] d\nu}{S \cdot L} = \frac{A_{\text{abs}}}{S \cdot L}, \quad (7)$$

式中, A_{abs} 是积分光谱吸收系数。理想气体公式建立了分子数密度与压强的关系:

$$P = N \cdot k \cdot T_{\text{temp}}, \quad (8)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数，取值为 1.38×10^{-23} J/k， T_{temp} 为气体热力学温度。将 (7) 式带入 (8) 式可得目标气体的压强^[27]。假设气体池中的总压强为 P_{total} ，则其浓度可表示为：

$$C = P / P_{total} \quad (9)$$

3 实验装置

EODCS 测量装置如图 2 所示，光源部分采用一台 L 波段的窄线宽连续激光器 (CW, LTL-500, LaseGen)，其波长调谐范围为 1570–1610 nm，覆盖了待测气体 CO、CO₂ 的部分泛音区吸收谱线。经放大后，CW 激光功率由 10 mW 被放大至 150 mW。使用 50:50 的光纤耦合器 OC₁ 将 CW 光分为两路，并分别注入两个带宽为 40 GHz 的强度调制器 (IM, MXAN-LN-40, Photline) 产生电光梳。为了确保外差探测后光频和射频梳齿的映射关系以及避免射频的零频噪声，本振光路的激光经过声光移频器 (AOM) 移频后再进行调制。AOM 的驱动频率为 100 MHz，由射频信号发生器 (SG, SMC100A, Roudé&Schwarz) 供给。两台光梳的重复频率由 IM 的驱动频率决定，受到射频源限制，其调谐范围覆盖 9 kHz–1 GHz。实验中信号光重复频率 f_r 和双光梳重复频率差 Δf 分别设置为 200 MHz 和 0.25 MHz。调制后，IM 输出两路脉宽为 30 ps 的光脉冲信号，其功率均为 100 μ W。双光梳分别被 10:90 的光纤耦合器 OC₂、OC₃ 分为两个支路，其中弱光支路经 2×2 的光纤耦合器 OC₄ 合束后接入平衡探测器 BPD₁ 作为参考信号，一强光支路经气体池后与另一强光支路合束 (OC₅)，并接入平衡探测器 BPD₂ 作为吸收信号。由于强度调制深度有限，光梳中包含部分未被调制的 CW 光信号。实验中选用交流耦合平衡放大光电探测器 (BPD, PDB480C-AC, Thorlabs) 抑制 CW 激光。公式 (5) 表明吸光度与吸收长度成正比，因此这里采用多通气体池将光与气体分子相互作用长度延长至 10 m，以获取高灵敏气体吸收光谱^[19, 28]。最后，两个 BPD 的输出信号由数据采集卡 (ATS9626, AlazarTech) 记录，其采样频率设置为 250 MS/s，可确保参考信号与吸收信号的射频谱信息完整采集。

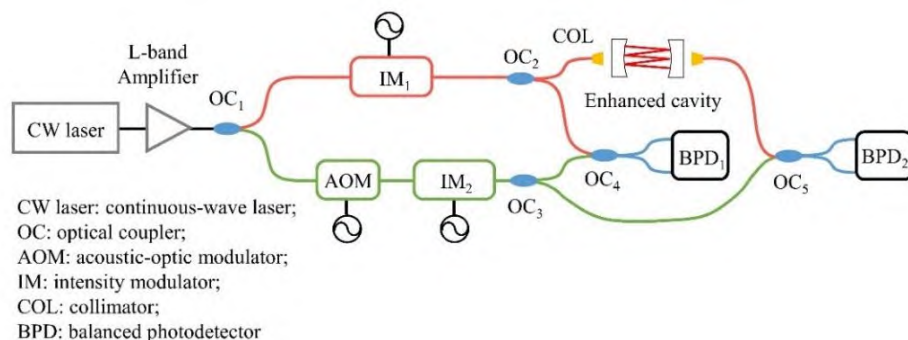


图2 EODCS实验装置图

Fig. 2 Diagram of EODCS experimental setup

4 结果与分析

4.1 系统特性

吸收光谱的线型参数会影响浓度测量结果的准确性与一致性。因此，光谱分辨率、测量时间、双光梳系统的相干性以及强度抖动作为线型影响因素，需要经过合理的设置与检测。为消除光源的强度抖动，实验中设置参考光路实时监测。图3(a)展示了参考光路的光外差干涉信号，其时间长度为0.028 ms，干涉信号的周期即光谱刷新率为4 μ s。采集4 ms的时域信号并进行傅里叶变换，可得到如图3(b)所示的射频谱图。射频梳的中心(100 MHz)与梳齿间隔(0.25 MHz)分别对应偏置频率 f_{AOM} 和重复频率差 Δf ，其梳齿根数超过180根。光谱分辨率由光频梳齿间隔决定，实验中设置为200 MHz (1.6 pm)，较商用光谱仪参数提升1-2个量级。单次测量中光梳谱宽为36 GHz，受限于IM带宽。

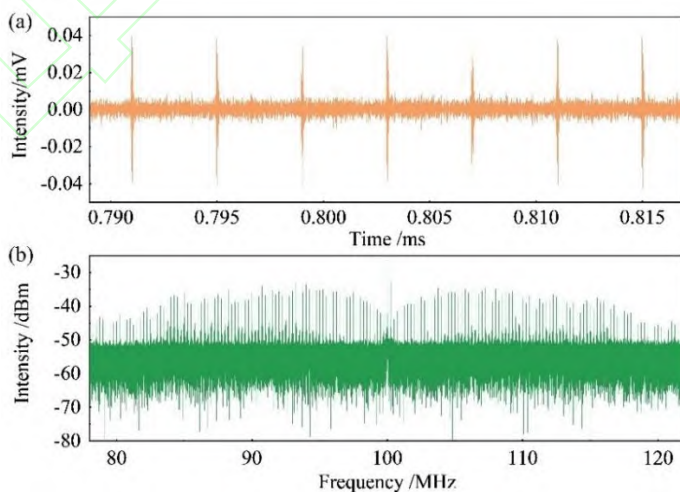


图3 双光梳的时频域特性。(a) 时域外差干涉信号；(b) 傅里叶变换后的射频谱

Fig. 3 Time and frequency domain characteristics of dual-comb system. (a) Heterodyne interferograms in the time domain; (b) fourier-transformed radio frequency spectrum

为了表征双光梳系统相干特性，实验中记录了不同测量时间下的拍频信号，并计算其射频频域的信噪比。信噪比的计算方法是在线性坐标下，采用梳齿强度除以底噪的标准方差。测量时间与信噪比的关系曲线如图 4 所示。在 100 s 的积分时间内，信噪比随时间呈现递增趋势。在横纵坐标均为对数坐标下，曲线斜率为 0.499，表明信噪比随 $\tau^{1/2}$ 线性变化。由此推测，该系统的相干时间在 100 s 以上。长的平均时间有利于提高频谱信噪比^[29]。

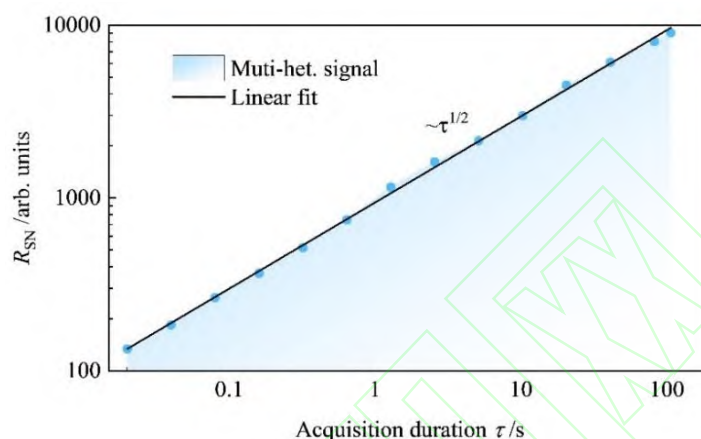


图4 信噪比随采集时间的变化

Fig. 4 Signal-to-noise ratio (R_{SN}) as a function of acquisition duration τ .

4.2 分子光谱测量

在验证性实验中，基于上述系统采用多通气体池进行双光梳光谱测量。池中充入 0.645 atm 的 CO_2 气体，气体温度为 296.15 K。电光梳的中心波长由 CW 激光控制，可根据吸收峰的位置进行调谐。采用数据采集卡同时记录吸收信号与背景信号，归一化后，即可得到 CO_2 对应的透射光谱。图 5 (a) 展示了 CO_2 在 6361.91 cm^{-1} – 6365.35 cm^{-1} 波段的吸收谱，通过调谐 CW 激光频率合成。每个吸收峰均是通过对 4 ms 的时域信号（1000 个干涉周期）进行傅里叶变换得到。该结果与 HITRAN 数据库的仿真结果保持较好的一致性。此外，实验中测试了 CO 在 0.18 atm 气压下的吸收峰以及与 HITRAN 数据的对比，如图 5 (b) 所示，吸收峰对应的波数为 6338.59 cm^{-1} 。两种气体的吸收光谱结果表明，该系统可用于不同气压环境下的气体检测，并且与理论谱线线型较为符合。在低气压测量中，可通过进一步降低重复频率实现多普勒极限的高分辨光谱测量。

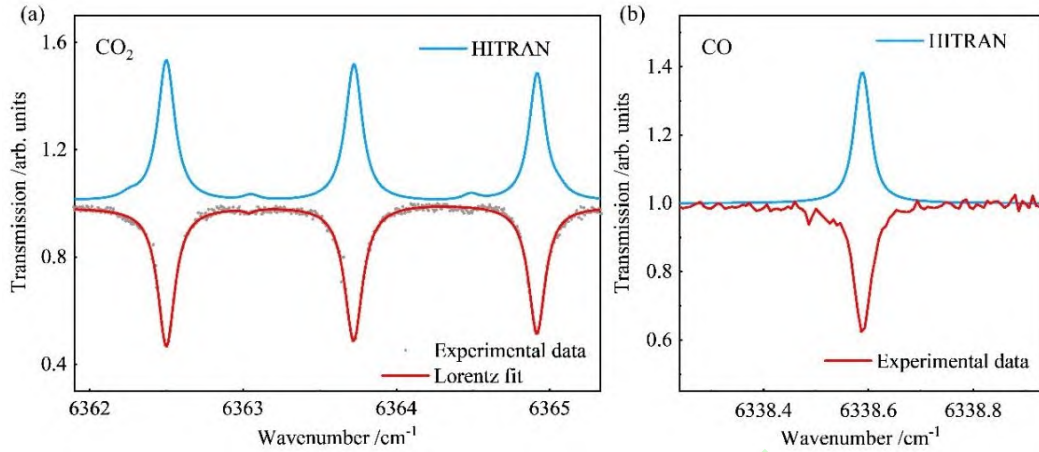


图5 不同气体的归一化双光梳光谱与HITRAN仿真数据对比。(a) CO₂在6361.91cm⁻¹-6365.35cm⁻¹波段；
(b) CO在6338.59 cm⁻¹波段

Fig. 5 Comparison between normalized dual-comb spectra and the HITRAN simulation data of different gases. (a) CO₂ from 6361.91 cm⁻¹ to 6365.35 cm⁻¹; (b) CO at 6338.59 cm⁻¹

4.3 浓度测量

根据公式(7)，浓度测量主要是计算积分光谱吸收系数 A_{abs} ，即需要测量入射光强 $I_0(\nu)$ 与出射的光强 $I(\nu)$ 。这两个参数可通过归一化以及拟合吸收谱获取。此外，还需已知样品气体的热力学温度 T_{temp} ，吸收长度 L 以及气体对应线型谱线的吸收强度 S 。其中吸收线强通过 HITRAN 数据库得到。实验中，在气体池中充入 0.65 atm 的 CO₂ 和 N₂ 混合气体。其中 CO₂ 的浓度为 49%，测量过程中气体温度为 196.15 K。为获得更准确的浓度值，这里选用了多吸收峰测量与反演方法，即采用上述方法测得 CO₂ 在 6364.92 cm⁻¹、6363.72 cm⁻¹、6362.50 cm⁻¹、6355.94 cm⁻¹、6341.39 cm⁻¹、6337.99 cm⁻¹、6334.46 cm⁻¹、6330.82 cm⁻¹、6327.06 cm⁻¹ 处的 9 个吸收峰，通过 Lorentz 线型拟合后求得每个吸收峰对应的 A_{abs} 以及浓度结果，相关参数在表 1 中列出。9 个吸收峰对应浓度值的一致性较好，其相对标准差为 2.86%。

表 1 CO₂ 的浓度测量结果

Table 1 The measured concentration of CO₂

Parameter	The measured concentration of 9 absorption peaks								
ν/cm^{-1}	6327.1	6330.8	6334.5	6338.0	6341.4	6355.9	6362.5	6363.7	6364.9
L/cm	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$S/(\text{cm}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$	1.29e-23	1.52e-23	1.62e-23	1.53e-23	1.20e-23	1.55e-23	1.64e-23	1.52e-23	1.38e-23
T_{temp}/K	296.15	296.15	296.15	296.15	296.15	296.15	296.15	296.15	296.15
$A_{\text{abs}}/\text{cm}^{-1}$	0.1006	0.1150	0.1248	0.1183	0.0939	0.1142	0.1291	0.1236	0.1042

$N/(\text{mol}\cdot\text{cm}^{-3})$	7.81e+	7.56e+	7.69e+	7.75e+	7.82e+	7.36e+	7.87e+	8.11e+	7.53e+
	18	18	18	18	18	18	18	18	18
C	0.4913	0.4751	0.4835	0.4876	0.4919	0.4628	0.4949	0.5102	0.4737

此外，实验中还对 CO_2 的吸收峰进行多次测量，图 6 展示了上述 9 个吸收峰的计算结果与真实值之间的偏差以及每个吸收峰对应浓度值的离散程度（每个吸收峰处数据代表相同波数下 10 次计算结果）。如图中的误差条所示，最大的浓度不确定度为 1.525%，平均不确定度为 1.1%，与真值的误差范围为 0.0267。表明该系统在计算气体浓度方面具备较好的准确性和一致性。

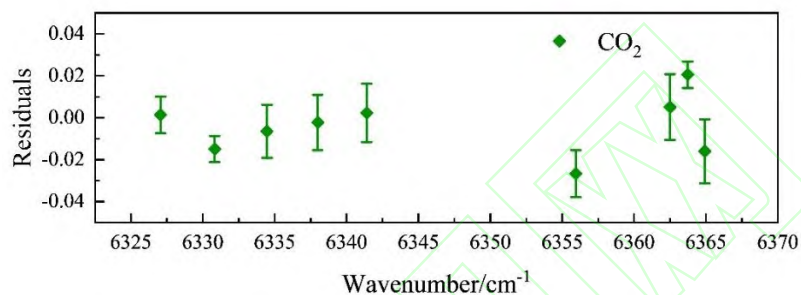


图6 CO_2 不同吸收峰的浓度测量

Fig. 6 Concentration measurement of CO_2 different absorption peaks

为了验证该系统用于实时气体监测的能力，选取 CO 在 6364.77 cm^{-1} 处的吸收谱线进行光谱测量。实验中首先测试了总气压在 10 mbar 下不同浓度 CO 的吸收光谱，如图 7 (a)、(b) 所示，通过上述方法计算出 CO 浓度值分别为 36% 和 74.5%。浓度提升使得光谱透射率变低。随后，向气体池中充入未知浓度的 CO 与 N_2 混合气体，并记录对应的参考信号与吸收信号。处理后的归一化透射谱如图 7 (c)、(d) 所示，每个吸收谱仅耗时 4 ms。随着总气压的升高（10 至 180mbar，气压计测量值），在碰撞加宽影响下，吸收谱线变宽；同时随着 CO 分子数的增多，透射率下降。通过公式 (7) 和 (8)，我们推算出图 7(c) 与 (d) 所对应的 CO 气体浓度分别为 42.9% 与 45.0%。

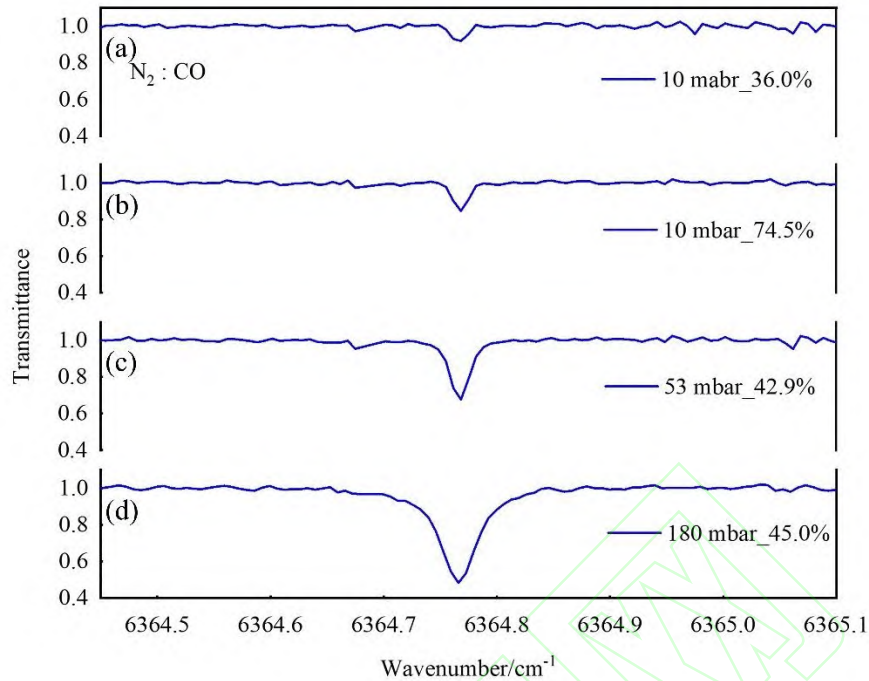


图7 CO的浓度演变过程

Fig. 7 The evolution of CO concentration

5 结 论

本文研究了基于电光双光梳光谱技术的气体浓度测量方法，利用 EODCS 系统实现 200 MHz 的高分辨、快速 ($4 \mu\text{s}$) 光谱测量。结合郎伯比尔定律与理想气体公式，实现了气体浓度分析。实验中测得 CO_2 的 9 个吸收峰光谱，经过拟合与浓度计算后得到浓度测量相对标准差为 2.86%。此外，本文通过对 CO 气体浓度的监测，验证了 EODCS 系统对气体浓度信息的实时反馈性能，为推进高分辨光梳光谱技术在电力设备故障气体测量领域的应用提供了技术参考。

参考文献

- [1] Giaccari P, Deschênes J D, Saucier P, et al. Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method[J]. *Optical Express*, 2008, 16(6): 4347–4365.
- [2] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Communication*, 2014, 5(1): 3375.
- [3] Okubo S, Iwakuni K, Inaba H, et al. Ultra-broadband dual-comb spectroscopy across 1.0–1.9 μm [J]. *Applied Physics Express* 8(8): 082402.

- [4] Schroeder P J, Wright R J, Coburn S, et al. Dual frequency comb laser absorption spectroscopy in a 16 MW gas turbine exhaust[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4565-4573.
- [5] 路桥,时雷,毛庆和.双光梳光谱技术研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0400001.
Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0400001.
- [6] 杨昌喜,赵康俊,曹博,等.单腔双光梳锁模光纤激光器及其应用研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1501001.
Yang C X, Zhao K J, Cao B, et al. Recent progress of single-cavity dual-comb mode-locked fiber lasers and their applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1501001.
- [7] Ycas G, Giorgetta F R, Cossel K C, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy of volatile organic compounds across long open-air paths[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 165-168.
- [8] Bustamante S, Manana M, Arroyo A, et al. Dissolved gas analysis equipment for online monitoring of transformer oil: A review[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4057.
- [9] Faria D H, Cost J G S, Olivas J L M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 46: 201-209.
- [10] 李梦醒. 变压器油中溶解气体监测系统研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1-5.
Li M X. Research and application of transformer oil dissolved gas monitoring system[D]. Beijing: School of Electrical and Electronics Engineering, 2017: 1-5.
- [11] Fan J, Wang F, Sun Q, et al. SOFC detector for portable gas chromatography: High-sensitivity detection of dissolved gases in transformer oil[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(5): 2854-2863.
- [12] Fan J, Liu Z, Meng A, et al. Characteristics of tin oxide chromatographic detector for dissolved gases analysis of transformer oil[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 94012-94020.
- [13] 赵君娇,袁彤哲,唐红,等.变压器油中溶解气体在线监测装置现场检验方法的研究[J]. *东北电力技术*, 2019, 40(07): 43-46.
Zhao J J, Yuan T Z, Tang H, et al. Research on field accuracy calibration method of transformer chromatography on-line monitoring device[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2019, 40(07): 43-46.
- [14] Adler F, Masłowski P, Foltynowicz A, et al. Mid-infrared Fourier transform spectroscopy with a broadband frequency comb[J]. *Optical Express*, 2010, 18(21): 21861-21872.
- [15] Baumann E, Giorgetta F R, Swann W C, et al. Spectroscopy of the methane ν_3 band with an accurate midinfrared coherent dual-comb spectrometer[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(6):62513-62513.
- [16] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 043817.
- [17] 陆诗雨,郝强,刘婷婷,等.基于非线性环形镜锁模的全保偏光纤光梳系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2101002.
Lu S Y, Hao Q, Liu T T, et al. All polarization maintaining fiber-based optical comb system with nonlinear loop mirror mode-locking[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101002.
- [18] Parriaux A, Hammani K, Millot G. Electro-optic frequency combs[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(1): 223-287.

- [19] Long D A, Fleisher A J, Douglass K O, et al. Multiheterodyne spectroscopy with optical frequency combs generated from a continuous-wave laser. *Optical Letters*, 2014, 39(9): 2688–2690.
- [20] Millot G, Pitois S, Yan M, et al. Frequency-agile dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 27-30.
- [21] Yan M, Luo P L, Iwakuni K, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with electro-optic modulators[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(10): e17076-e17076.
- [22] Wang S, Fan X Y, Xu B X, et al. Fast MHz spectral-resolution dual-comb spectroscopy with electro-optic modulators[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 65-68.
- [23] Guay P, Genest J, Fleisher A J. Precision spectroscopy of H 13 CN using a free-running, all-fiber dual electro-optic frequency comb system[J]. *Optics letters*, 2018, 43(6): 1407-1410.
- [24] Martín-Mateos P, Jerez B, Largo-Izquierdo P, et al. Frequency accurate coherent electro-optic dual-comb spectroscopy in real-time[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9700-9713.
- [25] 刘鹏飞,任麟昊,闻浩,等.集成电光频率梳研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(05): 35-52.
- Liu P F, Ren L H, Wen H, et al. Progress in integrated electro-optic frequency combs[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(05): 35-52.
- [26] 张馨,殷科,张江华,等.高平坦大带宽25GHz双光频梳源[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1116002.
- Zhang X, Yin K, Zhang J H, et al. 25 GHz dual frequency comb source with high flatness and large bandwidth[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1116002.
- [27] Li D T, Ren X Y, Yan M, et al. Rapid and precise partial pressure measurement of multiple gas species with mid-infrared electro-optic dual-comb spectroscopy[J]. *Optik*, 2021, 242: 167341.
- [28] Zolot A M, Giorgetta F R, Baumann E, et al. Direct-comb molecular spectroscopy with accurate, resolved comb teeth over 43 THz. *Optical Letters*, 2012, 37(4): 638–640.
- [29] Chen Z J, Yan M, Hänsch T W, et al. A phase-stable dual-comb interferometer[J]. *Nature communications*, 2018, 9(1): 1-7.

网络首发:

标题: 基于电光双光梳光谱的气体浓度测量方法研究

作者: 王杰,刘睿,廖文龙,任心仪,马慧,闫明,曾和平,黄勤清,程林

收稿日期: 2022-08-17

录用日期: 2022-09-05

DOI: 10.3788/LOP222318

引用格式:

王杰,刘睿,廖文龙,任心仪,马慧,闫明,曾和平,黄勤清,程林. 基于电光双光梳光谱的气体浓度测量方法研究[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(17):1730002.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别,请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

可调谐半导体激光吸收光谱技术在石油工业中的应用研究

李金义 李连辉 赵烁 任鹏 田珊军 靳红利

天津工业大学控制科学与工程学院天津市电气装备智能控制重点实验室,天津 300387

激光与光电子学进展,2022,59(13):1300006

“光刻技术”专题 前言

王向朝 韦亚一 邱建荣

激光与光电子学进展,2022,59(9):0900000

芯片制造语境下的计算光刻技术

施伟杰 俞宗强 蒋俊海 车永强 李思坤

东方晶源微电子科技(北京)有限公司,北京 100176

激光与光电子学进展,2022,59(9):0922001

基于光子晶体光纤四波混频效应的甲烷传感测量

刘海 陈灿灿 张文 王浩然 唐守锋

中国矿业大学信息与控制工程学院,江苏 徐州 221116

激光与光电子学进展,2020,57(19):191203

基于分布反馈激光器双波长调制的微量气体测量方法

李志军 陈伟根 季焱 曹玲燕 吴淼 张建学 糕莉 喻勇高

重庆大学电气工程学院,四川 重庆 400044

激光与光电子学进展,2017,54(11):111404