

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.04.09

激光色散光谱高温气体传感技术研究进展

周晨¹, 郭双¹, 马柳昊^{1,2*}

(1. 武汉理工大学 低碳燃烧与动力研究中心, 湖北 武汉 430070;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 激光色散光谱(Laser Dispersion Spectroscopy, LDS)是一种先进的光谱类气体检测技术, 其具有宽动态范围检测特性以及对光功率波动的强免疫特性, 已在痕量气体检测和燃烧诊断领域受到极大关注。从开展LDS技术研究的动机出发, 系统介绍了基本光谱原理, 构建了理论分析框架; 重点阐述了外差相敏色散光谱技术(Heterodyne Phase-Sensitive Dispersion Spectroscopy, HPSDS)和啁啾色散光谱技术(Chirped Laser Dispersion Spectroscopy, CLaDS)的特征与实现方法, 并探讨了免标定数学物理模型的构建方法。通过梳理近十年该技术在燃烧诊断、高温烟气监测、环境光学痕量气体探测等典型场景的应用案例, 揭示了不同应用维度的技术需求特征。最后, 针对现有检测灵敏度不足、测量系统复杂等瓶颈问题, 从基础研究和应用需求两个维度展望了未来发展方向, 为LDS技术的理论深化和工程化应用提供了系统化参考。

关键词: 激光色散光谱技术; 相位检测; 免标定测量; 燃烧诊断; 痕量气体检测

中图分类号: TP212; O433.5; O657.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 04-0119-22

Advances in high-temperature gas sensing techniques using laser dispersion spectroscopy

ZHOU Chen¹, GUO Shuang¹, MA Liuhao^{1,2*}

(1.Center for Low-Carbon Combustion and Propulsion, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2.State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: LDS is an advanced laser-based spectroscopic technique for gas sensing with a broad dynamic range and high immunity to optical power fluctuations. It has attracted considerable attention in trace gas detection and combustion diagnostics. Starting from the motivation for conducting research on LDS technology, this review systematically introduces the fundamental spectroscopic principles of LDS and establishes a theoretical analysis framework. It highlights the key features and implementation methods of HPSDS and CLaDS, and explores approaches for constructing calibration-free models. By examining the representative LDS applications in the past decade in typical scenarios such as combustion diagnostics, high-temperature flue gas monitoring, and environmental optical trace gas detection, this review elucidates the

收稿日期: 2025-04-01; **修回日期:** 2025-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52476168, 52106221); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室开放基金项目(SKLA02022001-A05)

引用格式: 周晨, 郭双, 马柳昊. 激光色散光谱高温气体传感技术研究进展[J]. 计测技术, 2025, 45(4): 119-140.

Citation: ZHOU C, GUO S, MA L H. Advances in high-temperature gas sensing techniques using laser dispersion spectroscopy[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 119-140.



distinct technical requirements of these application domains. Finally, regarding such challenges as the insufficient detection sensitivity and complex system configurations, the paper indicates the future development directions from both fundamental research and practical application perspectives, providing a systematic reference for advancing the theoretical foundations and engineering applications of LDS.

Key words: laser dispersion spectroscopy; phase detection; calibration-free measurement; combustion diagnostics; trace gas sensing

0 引言

随着“十四五”规划的纵深推进，我国经济发展方式从规模速度型向质量效率型转变，“高端化、智能化、绿色化”现代化产业体系的加速构筑对工业燃烧动力装备提出了更高的节能减排要求。高保真在线数据监测是实现这些装备高效低排放运行的基础，也是推动高端核心装备研制和“双碳”目标实现的关键支撑。近年来，国家瞄准化石能源清洁利用、燃烧系统深度脱碳和排放、大气环境监测相关领域布局了一大批重要研究方向，其中，如何实现气体参数的高保真定量测量成为亟须解决的共性关键问题之一。

伴随光电材料和微机电加工领域的技术突破，以激光光谱技术为代表的非侵入式气体传感技术逐渐成为解决上述共性关键问题的有效手段^[1]。激光光谱技术通过探测目标燃烧场中原子、分子或者自由基与激光相互作用产生的吸收、散射或者荧光信号，结合吸收、散射或者荧光光谱模型，实现燃烧诊断与气体状态参数反演^[2-5]。这些测量技术具有灵敏度高、选择性好和时间响应快等显著优势，近年来在国内外基础研究和工程应用中受到重视，也是当前气体传感领域的研究热点^[6-13]。基础研究对测量精度、不确定度和动态响应范围等性能指标的要求日趋严格，复杂恶劣的现场测试环境(特别是非均相燃烧过程的强辐射、非均匀等环境)对测量技术提出了更高的运行稳定性和数据可靠性要求，激光光谱气体技术正面临诸多挑战。

从激光光谱学的物理原理^[14]和检测技术^[15]出发，在众多代表性的高温气体传感技术中，激光诱导荧光(Laser Induced Fluorescence, LIF)、瑞利散射(Rayleigh Scattering, RS)、相干反斯托克斯拉曼

散射(Coherent Anti-stokes Raman Scattering, CARS)和激光吸收光谱(Laser Absorption Spectroscopy, LAS)等方法本质上依赖光电探测器、光电倍增管或电荷耦合器件对光强(如荧光、散射光或透射光光强)的探测，其测量性能与探测器接收光功率的稳定性直接相关(如图1所示)。当探测器捕捉到的光强发生波动或饱和时，与探测器接收光功率相关的原始信号可能会失真，进而制约测量结果的准确性和可靠性。

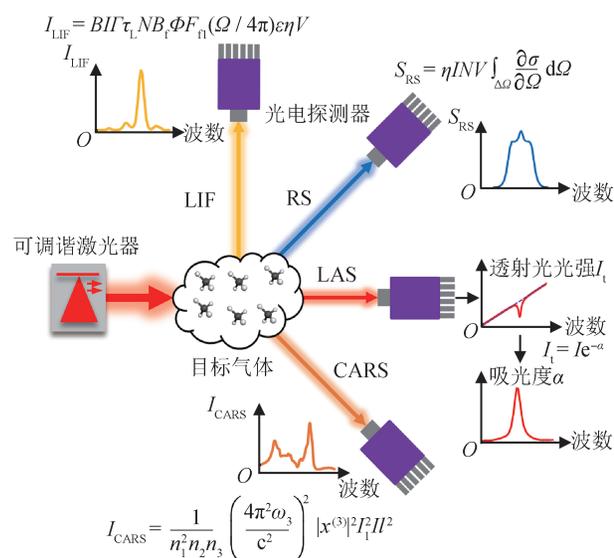


图1 代表性激光光谱气体传感技术的特征光谱信号及其对光强依赖关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of characteristic spectra of representative laser spectroscopic gas sensing technology and their dependence on light intensity

国内外学者基于光强检测技术进行了进一步研究，减小了光强波动或饱和带来的影响：在LIF技术中，通过建立三级激光诱导荧光模型，进一步研究了荧光信号与激光能量密度之间的关系，提出了部分饱和下荧光信号与激光能量的非线性依赖关系，为LIF技术在高饱和状态下的应用开辟

了可能性^[16]。在CARS技术中,通过将信号光引导至远离测量点的方法,隔离非相干的碳烟、气体辐射干扰。LAS技术采用一次谐波(1f)归一化二次谐波(2f)检测的波长调制吸收光谱(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)方法^[17],可以在一定程度上抵消光功率波动所带来的不利影响,但是当抵达探测器的总光强衰减或拾升过大时,原始信号也会失真。此外,外部环境振动、电噪音过大和有源光电器件的零点漂移给复杂恶劣环境中的高保真光谱信号测量带来了更大挑战。因此,亟须研究新型激光光谱技术以应对激光功率波动以及复杂恶劣环境干扰。

与前述依赖光强探测的激光光谱高温传感技术不同,基于LDS的气体传感技术^[18-19]通过探测激

光穿过气体前后与光子吸收相关的折射率波动引起的光场相位变化(即色散)来获取高温气体状态参数信息。色散是伴随激光吸收同时存在的固有物理现象,在技术原理上(如图2所示),LDS技术不再直接依赖Beer-Lambert定律,而是从Kramers-Kronig关系出发^[20],将传统激光光谱技术中的光强探测转移到光相位探测,避免了光强探测的诸多限制。该技术是一种相位探测技术,目标色散相位信号对探测器接收光功率的波动具有免疫性(如图2实测的CO₂和CH₄色散光谱),同时拥有宽动态检测范围(10⁻⁶至10⁻²级),特别适合强辐射、高消光非均相燃烧场等复杂环境下的定量测量应用。图2的色散物理过程中,光的相位信息与折射率变化直接相关,同时折射率通过Kramers-Kronig关系

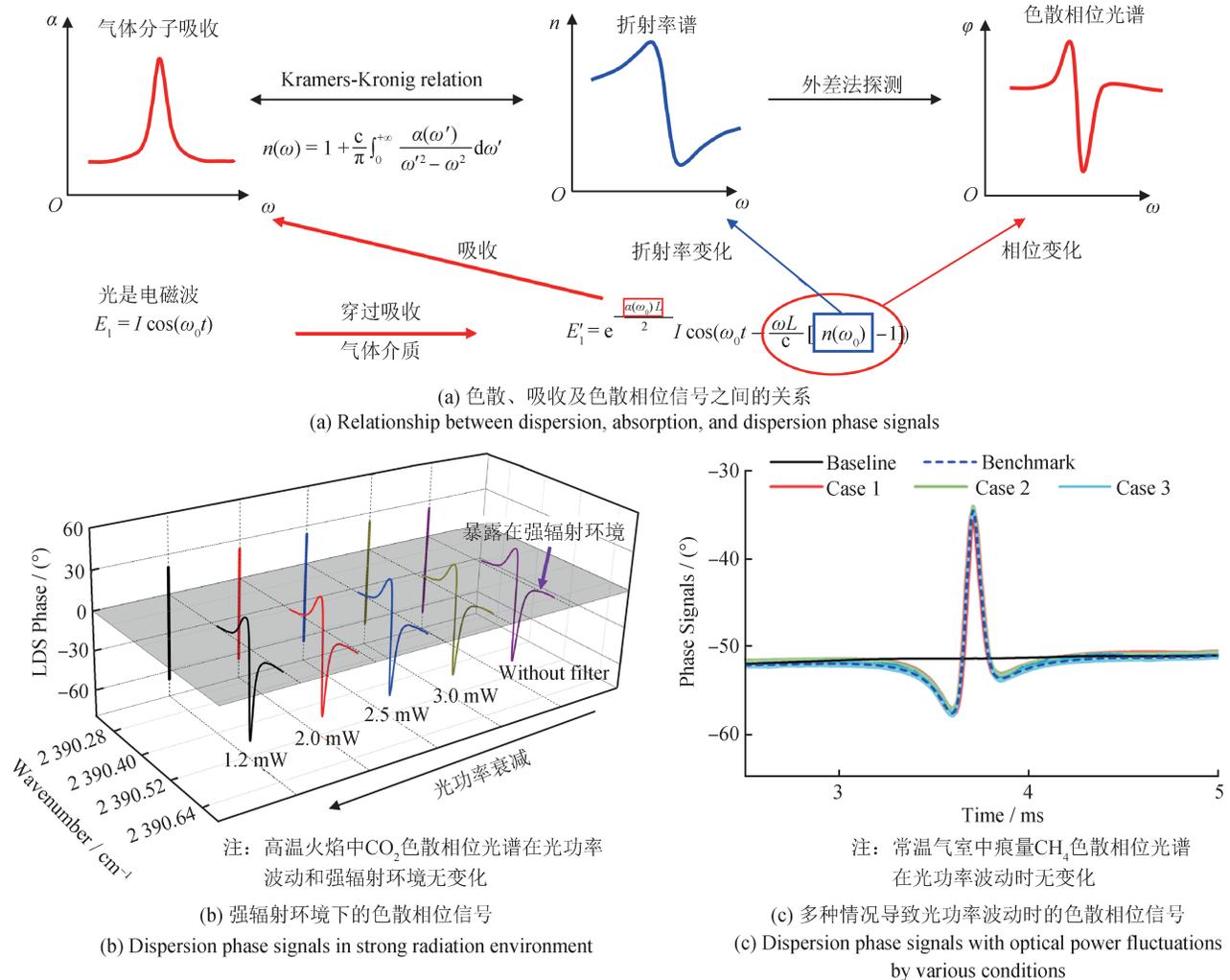


图2 色散与吸收的关系及色散信号对光功率波动的免疫性^[22]

Fig.2 Relationship between dispersion and absorption, and immunity of dispersion signals to optical power fluctuations^[22]

与吸光度定量关联，因而LDS技术具有LAS技术的众多优势，特别是高灵敏测量技术和免标定测量策略。此外，前期LDS技术对光功率波动表现出较强的稳定性^[18-19, 21]，因此，依赖光相位检测的激光色散光谱技术是实现高温气体参数高保真检测的有效手段。

当前，基于LDS技术进行气体探测的基础研究和工业应用的单位如下：国外主要有普林斯顿大学、西班牙马德里卡洛斯三世大学、波兰弗罗茨瓦夫科技大学、英国卢瑟福·阿普尔顿国家实验室；国内主要有香港中文大学、武汉理工大学、南昌航空大学、清华大学、北京航空航天大学、吉林大学等。值得注意的是，在目前LAS技术气体传感器占据激光气体传感领域主流地位和市场份额的情况下，英国光谱仪研发商MIRICO已成功研发了基于LDS技术的气体传感器，该传感器经过开发、测试和应用，目前正在温室气体观测和燃料泄漏监测等领域逐步推广使用。

考虑到近十年LDS技术在气体传感领域的飞速发展以及当前测试需求对传感方法及传感器的新要求，有必要对高温气体参数测量的LDS研究进展进行梳理和总结。本文主要综述了LDS技术气体传感技术的研究现状，着重介绍了LDS技术实现气体参数定量测量的技术原理、免标定数学

物理分析模型、各类场景应用和最新进展。

1 激光色散光谱原理

根据气体吸收与其折射率之间的Kramers-Kronig关系，可得式(1)，其中， ω 为角频率， c 为光速， $n(\omega)$ 和 $\alpha(\omega)$ 分别为频率为 ω 的光在吸收介质中的折射率与吸收系数。由计算吸收系数式(2)，可得折射率与气体参数的关系，如式(3)所示。

$$n(\omega) = 1 + \frac{c}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (1)$$

$$\alpha(\omega) = PXS_i(T)\phi(\omega) \quad (2)$$

$$n(\omega) - 1 = \frac{PXS_i(T)c}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\phi(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \propto X \quad (3)$$

式中： P 为压强， X 为气体浓度， $S_i(T)$ 为跃迁 i 在温度 T 下的谱线强度， $\phi(\omega)$ 为线型函数。

当激光与目标吸收气体介质作用后，由于介质存在与吸收相关的固有折射率变化，激光光场的相位将产生与物质折射率相关的变化，通过测量激光光场相位变化导致的拍频信号相位变化，可获取目标气体参数信息(如温度和气体浓度)。

红外光的频率为THz量级，紫外光的频率更高，目前没有仪器或者技术手段能够直接测量光相位变化。因此，如何实现色散相位信号的高保真、高精度检测是该领域的一个研究重点。最常

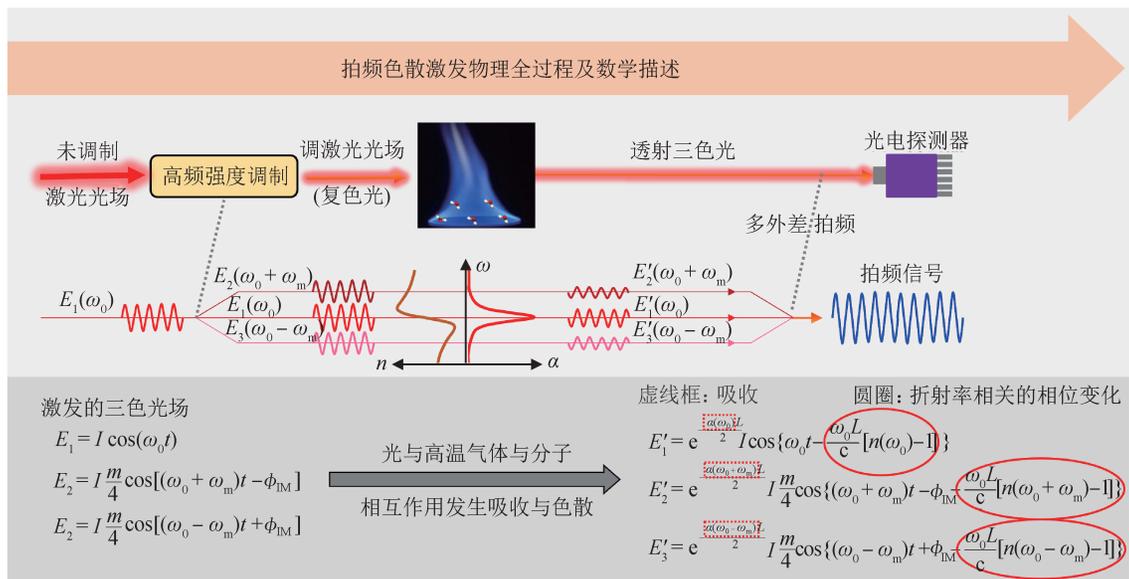


图3 色散物理过程示意图及数学分析模型

Fig.3 Schematic diagram and mathematical analysis model of dispersion physics process

见的方法是对激光添加调制，使其产生上频移或下频移的边带，通过检测边带与载波打在光电探测器上所产生的拍频信号的相位信息，间接获得光相位的信息。

图3为色散产生的物理过程示意图及光场与待测分子作用过程的数学模型。当前，LDS技术主要分为CLaDS技术和HPSDS技术2种，下面具体展开介绍。

1.1 啁啾色散光谱

CLaDS技术最早由WYSOCKI G、WEIDMANN D、NIKODEM M和WYSOCKI G等人提出^[23-25]，他们采用量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)与声光调制器(Acousto-Optic modulator, AOM)将该技术成功应用于气体传感中。当频率为 ω_0 的特定波长激光穿过AOM时，将在不同方向上输出由原波长的0级衍射与存在光学下频移 Ω 的1级衍射构成的二色光，0级衍射与1级衍射激光光场 E_{0th} ， E_{1th} 的表达式为

$$E_{0th} = A_0 \cos(\omega_0 t) \quad (4)$$

$$E_{1th} = A_1 \cos(\omega_1 t - \psi_1) \quad (5)$$

式中： ω_0 为激光中心波长对应的角频率； ω_1 为发生光学下频移的1级衍射激光角频率； $\omega_1 = \omega_0 - \Omega$ ， Ω 为AOM的调制频率； A_0 、 A_1 分别为0级衍射与1级衍射的光场振幅； ψ_1 为AOM出射端面上0级衍射与1级衍射之间的初始相位差(为常数)。

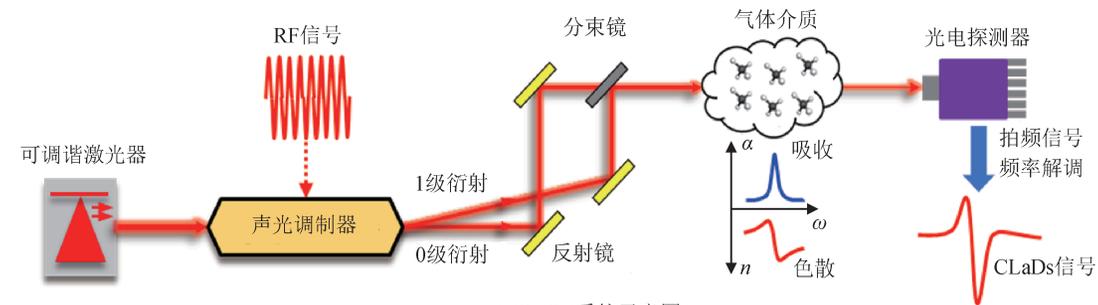
若调制后产生的2束光不穿过任何吸收介质且光程为0，经合束后打在平方律光电探测器上时，其相干产生的拍频信号 I_{CLaDS} 为

$$I_{CLaDS} \propto A_0^2 + A_1^2 + 2A_0A_1 \cos(\Omega t + \psi_1) = A_0^2 + A_1^2 + 2A_0A_1 \cos(\varphi_{CLaDS}) \quad (6)$$

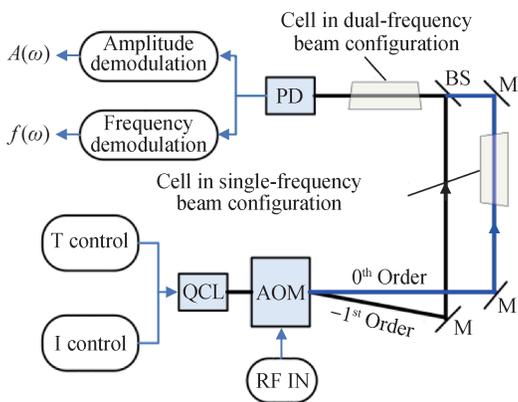
式中： φ_{CLaDS} 为与气体参数相关的色散相位信息。

如图4(a)所示，当二色光穿过吸收介质时，因介质折射率产生的相位信息将隐藏于拍频信号的相位 φ_{CLaDS} 中，CLaDS技术通过检测拍频信号的频率，得到与气体参数相关的CLaDS信号。

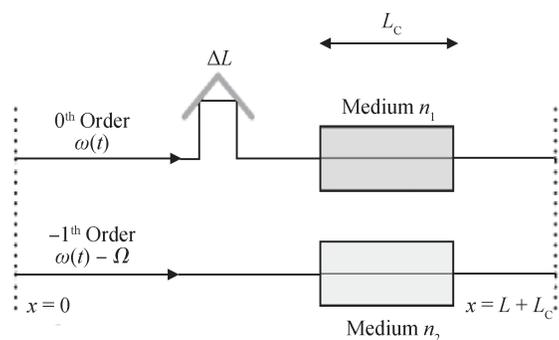
为了增强目标色散信号的幅度，CLaDS技术通



(a) CLaDS系统示意图
(a) Schematic diagram of CLaDS system



(b) CLaDS系统光路简图及参数表示
(b) Optical path diagram and parameter representation of CLaDS system



(c) 光学配置的简化模型
(c) A simplified model of optical configuration

图4 CLaDS系统图与光路简图^[23]

Fig.4 Schematic and optical path diagram of CLaDS system^[23]

过产生激光啁啾使激光频率发生变化,同时,为了更加方便地描述光谱模型,通常假设激光啁啾频率 ω_{CLaDS} 为线性,如式(7)所示。由式(4)、式(5)推导可知,此时经AOM调制后的二色光光场 E'_{0th} 、 E'_{1th} 分别如式(8)、式(9)所示(由于 ψ_1 为常数,为简化公式在此忽略)。

$$\omega_{\text{CLaDS}}(t) = \omega_0 + S \cdot t, \quad (7)$$

$$E'_{\text{0th}} = A'_0 \cos(\omega_0 t + \frac{1}{2} S \cdot t^2) \quad (8)$$

$$E'_{\text{1th}} = A'_1 \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \frac{1}{2} S \cdot t^2] \quad (9)$$

式中: S 为激光啁啾率, A'_0 、 A'_1 分别为发生激光啁啾时0级衍射与1级衍射的光场振幅。

如图4(b)所示,CLaDS技术通常具有2个系统配置方案:①双频光束配置,即0级衍射与1级衍射经过合束后共同穿过吸收-色散介质;②单频光束配置,此时仅有0级衍射穿过吸收-色散介质,1级衍射穿过等长度空气。由于吸收-色散介质的折射率对波长具有选择性,随着两色光在介质或空气中传播,两色光将发生不同大小的相移,最终打在平方律光电探测器上发生干涉,产生拍频信号,该信号的瞬时频率与两色光穿过介质时发生的相移有关,即反映了物质的相关理化信息。

在双频光束配置中,0级衍射与1级衍射经过合束后共同穿过吸收-色散介质。图4(c)为光学配置的简化模型,某时刻下,经AOM调制后的二色光从其分离点[图4(c)中 $x=0$]处到达光电探测器的传播时间 Δt_0 和 Δt_1 可以分别计算,公式为

$$\Delta t_0 = \frac{L + L_c [n(\omega_0) - 1] + \Delta L}{c} \quad (10)$$

$$\Delta t_1 = \frac{L + L_c [n(\omega_1) - 1]}{c} \quad (11)$$

式中: L_c 为气体池的长度, L 为1级衍射经过的空间光程(不包括气体池), ΔL 为0级衍射相对于1级衍射的光程差, $n(\omega)$ 为频率为 ω 的光穿过气体介质时的折射率。

根据式(6),结合式(8)~式(11),可以得到光电探测器拍频的相位 φ_{CLaDS} 与时间的关系函数 $\varphi_{\text{CLaDS}}(t)$ 为

$$\varphi_{\text{CLaDS}}(t) = [\Omega + S \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_0)]t - \Omega \cdot \Delta t_1 + \omega_0 \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_0) - \frac{1}{2} S \cdot (\Delta t_1^2 - \Delta t_0^2) \quad (12)$$

通过对相位求导 $f(t) = (1/2\pi) \cdot (d\varphi_{\text{CLaDS}}/dt)$,可以得到 I_{CLaDS} 信号的瞬时频率 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \{ \Omega + S \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_0) - \Omega \cdot \frac{d\Delta t_1}{dt} + S \cdot t \cdot (\frac{d\Delta t_1}{dt} - \frac{d\Delta t_0}{dt}) + \omega_0 \cdot (\frac{d\Delta t_1}{dt} - \frac{d\Delta t_0}{dt}) - S \cdot (\Delta t_1 \cdot \frac{d\Delta t_1}{dt} - \Delta t_0 \cdot \frac{d\Delta t_0}{dt}) \} \quad (13)$$

由式(7)可知: $t = (\omega - \omega_0)/S$,结合式(10)~式(11),可得到 Δt_0 和 Δt_1 对时间 t 的导数,即

$$\frac{d\Delta t_{0,1}}{dt} = \frac{L_c}{c} \cdot \frac{dn}{d\omega} \Big|_{\omega_{0,1}} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{S \cdot L_c}{c} \cdot \frac{dn}{d\omega} \Big|_{\omega_{0,1}} \quad (14)$$

将式(10)、式(11)、式(14)代入式(13),由于激光光频 ω_0 远大于调制频率 Ω ($\omega_0 \gg \Omega$),且远大于激光啁啾率与传播时间的乘积($\omega_0 \gg S \cdot \Delta t_{1,2}$),可得信号瞬时频率 $f(\omega)$ 为

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \{ \Omega - \frac{S \cdot L_c}{c} \cdot \omega \cdot (\frac{dn}{d\omega} \Big|_{\omega - \Omega} - \frac{dn}{d\omega} \Big|_{\omega}) + \frac{S \cdot L_c}{c} [n(\omega - \Omega) - n(\omega)] + \frac{S \cdot \Delta L}{c} \} \quad (15)$$

由泰勒公式近似可知 $n(\omega - \Omega) - n(\omega) = -\Omega (dn/d\omega) \Big|_{\omega}$,且 $\omega_0 \gg \Omega$,最终得到 $f(\omega)$ 的表达式为^[23]

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \{ \Omega + \frac{S \cdot \Delta L}{c} - \frac{S \cdot L_c}{c} \cdot \omega \cdot (\frac{dn}{d\omega} \Big|_{\omega - \Omega} - \frac{dn}{d\omega} \Big|_{\omega}) \} \quad (16)$$

从式(16)可知,拍频信号的频率与AOM的调制频率包含与调制频率 Ω 、激光啁啾率 S 与二色光光程差 ΔL 相关的偏置部分,可以通过调节光路使 $\Delta L = 0$,抵消除调制频率外的背景频率偏置;气体的参数信息则隐藏于包含折射率谱的一阶导数项之中,该信息可被气体池光程 L_c 与激光啁啾率 S 的乘积放大,通过提高激光啁啾率,可以成比例地提高系统的测量灵敏度。在实际测量中,拍频信号的频率由实时的高性能频谱仪进行实时检测,一氧化氮(NO)在 1912.8 cm^{-1} 附近的典型CLaDS信号如图5所示。

该方法被证明有良好的光功率波动(10 000倍)免疫性^[23],可用于探测光学厚的高吸光度状态;同时,根据适当的光学配置,CLaDS技术可实现免基线的光谱测量。但是,CLaDS作为一种频率检测方法,需要昂贵的频谱仪以实现频率的快速检测

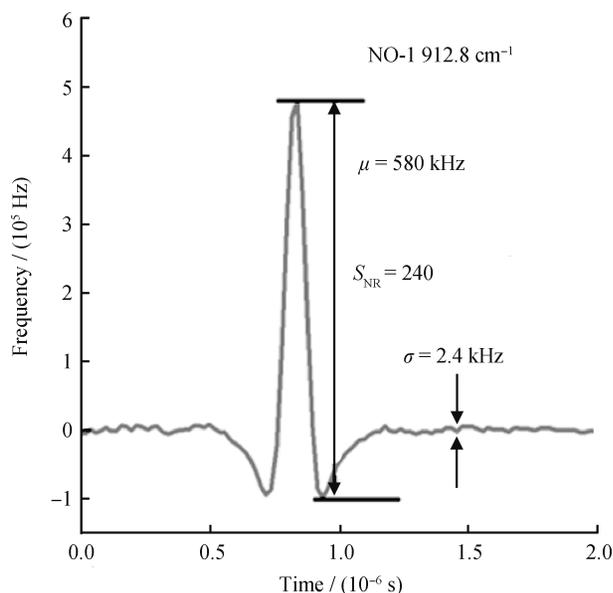


图5 实验中测得的典型CLaDS信号^[23]

Fig.5 Typical CLaDS signal measured in the experiment^[23]

与采集，且需要高带宽的激光器控制器以承受高调制速率。

1.2 外差相敏式激光色散光谱

不同于频率检测式检测，MARTÍN-MATEOS P等人发展了基于相敏检测的HPSDS技术^[26-29]，在相敏式检测中，通过光电调制器(Electro-Optic Modu-

lator, EOM)进行外部调制，如图6(a)所示；或对激光器注入电流进行直接电流调制(Direct Injection Current Modulation, DICM, 又称“注入电流抖动调制”)，如图6(b)所示。经过调制后的激光与待测目标分子作用后，由高速平方律探测器接收并产生拍频信号，通过降频解调系统将拍频信号频率降低至锁相放大器的带宽内，再由锁相放大器解调得出与气体参数相关的色散相位信号。

区别于CLaDS中激光经过AOM调制后仅产生1个边带，在HPSDS技术中，频率为 ω_0 的激光经过频率为 ω_m 的EOM外部调制或直接电流调制后将产生上下2个边带，并与载波一同构成三色光束，其各个组分的光场表达式为

$$E_{k-HPSDS} = A_k \cos[(\omega_0 + k \cdot \omega_m)t - \phi_k] \quad (17)$$

式中： $k = 0, 1, -1$ ，分别对应载波与上、下边带； A_k 为对应光场的振幅； ϕ_k 为对应光场的相位。

当三色光束经过气体后，其光场相位将产生与频率的相位变化 φ_k ，公式为

$$\varphi_k = \frac{(\omega_0 + k \cdot \omega_m)L_c}{c} [n(\omega_0 + k \cdot \omega_m) - 1] \quad (18)$$

当透射三色光束打在光电探测器检测上时，由式(6)可得到：载波与边带所产生的、频率为调

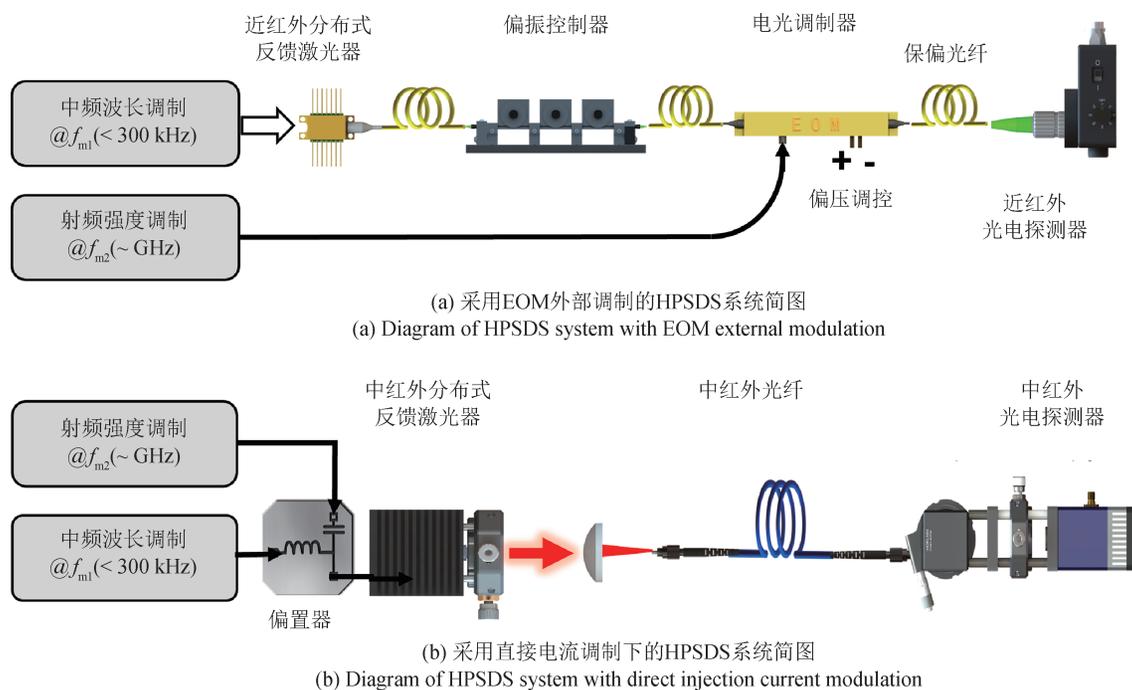


图6 不同调制方法下的HPSDS系统简图

Fig.6 Schematic diagram of HPSDS system under different modulation methods

制频率的拍频信号的相位 φ_{HPSDS} 为折射率(相位变化)、吸收系数(强度变化)及激光器调制参数 m 、 β 、 ϕ_f 的函数 $F^{[30]}$, 则

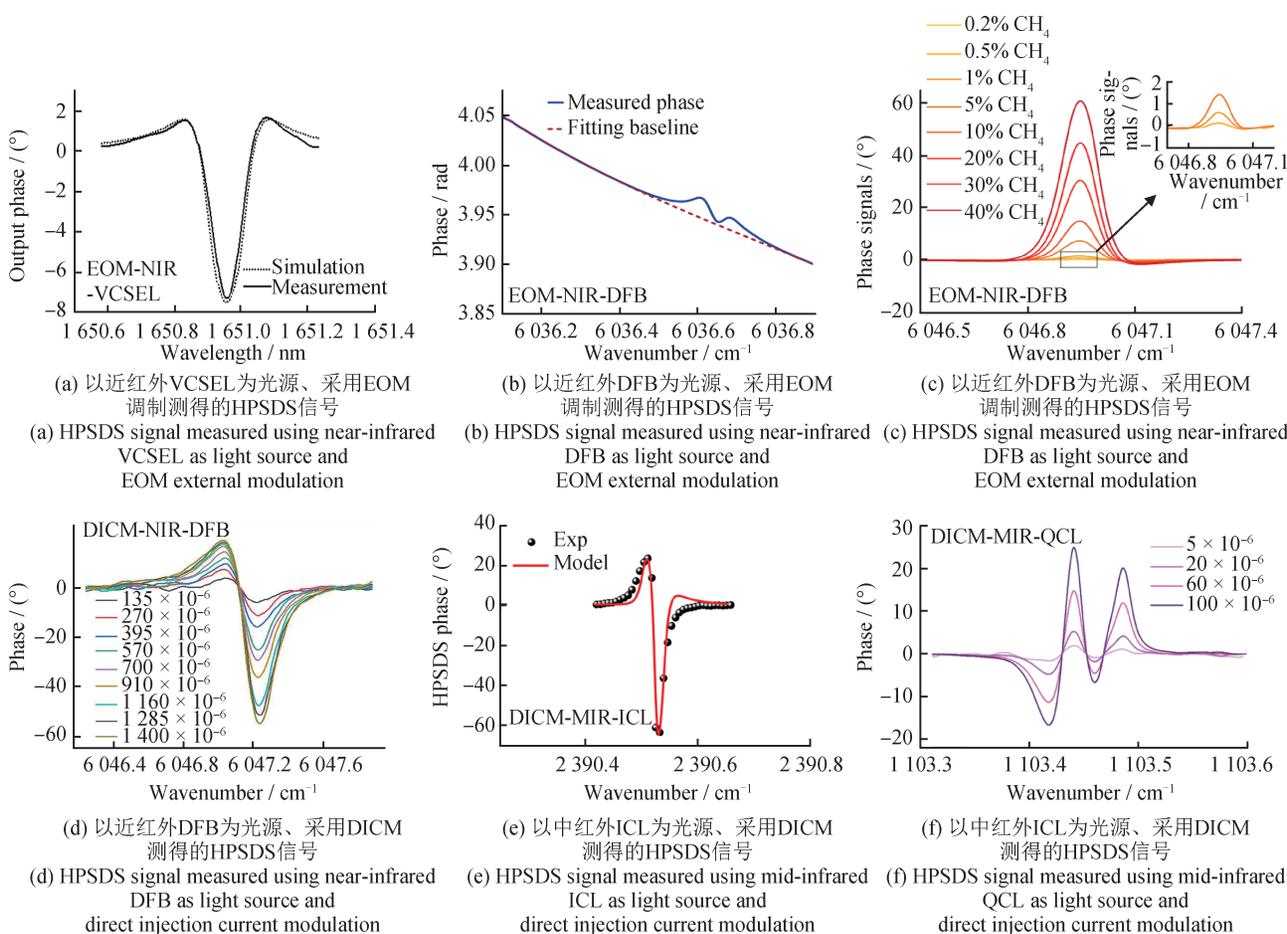
$$\varphi_{\text{HPSDS}} = F \{ n(\omega_0 \pm k \cdot \omega_m), \alpha(\omega_0 \pm k \cdot \omega_m), m, \beta, \phi_f \} \quad (19)$$

式中: α 为频率相关的吸收系数; m 、 β 、 ϕ_f 分别为激光器强度调制系数、频率调制系数、频率-强度调制间的相位差, 包含了测量目标的折射率信息。

在相敏式检测技术中, 为了解调得出拍频信号的相位, 一种方案是采用超高带宽的锁相放大器进行直接相位解调, 但此种方法对设备性能要求很高, 大幅提高了系统的搭建成本; 过往的

HPSDS技术采用了外差解调方案, 先通过混频器将GHz拍频信号降频至百kHz, 再通过较低带宽锁相放大器进行解调。近年来, 相关器件模块已经趋于成熟, 极大降低了系统的搭建成本。

值得一提的是, 由于成熟的商用近红外光电调制器易获取, 早期研究中通常利用EOM来实现色散光谱气体检测^[26, 31-32]; 而商用中红外EOM器件仍在发展, 目前中红外LDS技术的实现仍以直接电流调制的模式为主^[19, 21]; 此外, 南昌航空大学WU T等人通过直接电流调制的方式, 成功验证了近红外LDS技术的可行性^[33]。近-中红外不同光源在不同调制方法下的典型色散相位信号如图7所示。



注: 垂直腔表面激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL); 分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器; 带间级联激光器(Interband Cascade Laser, ICL)。

图7 不同激光光源在不同高频强度调制方法下的HPSDS色散相位信号^[19,21,26, 31-33]

Fig.7 HPSDS dispersion phase signals with different laser sources under different high-frequency intensity modulation methods^[19, 21, 26, 31-33]

2 激光色散光谱技术的检测方法研究

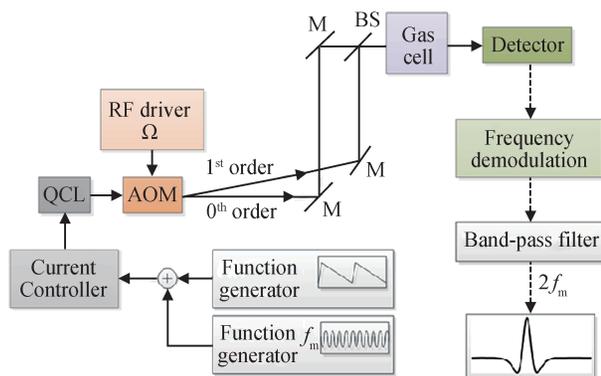
在系统性能指标评价中，过往的研究结果表明：基于相位检测的LDS技术具有更宽的动态检测范围以及对探测器接收到的光功率波动免疫的显著优势；但是在检测灵敏度方面，其性能指标与LAS中的直接吸收光谱技术相当，低于波长调制光谱技术。为了进一步发掘LDS技术在气体传感中的潜力，国内外研究人员针对LDS技术性能的提升进行了深入研究^[32, 34-37]；同时，更全面的色散光谱分析模型也被提出^[19, 22-23, 28, 30, 38]，补充了LDS技术在光谱原理上的不足。

2.1 色散信号检测性能提升研究

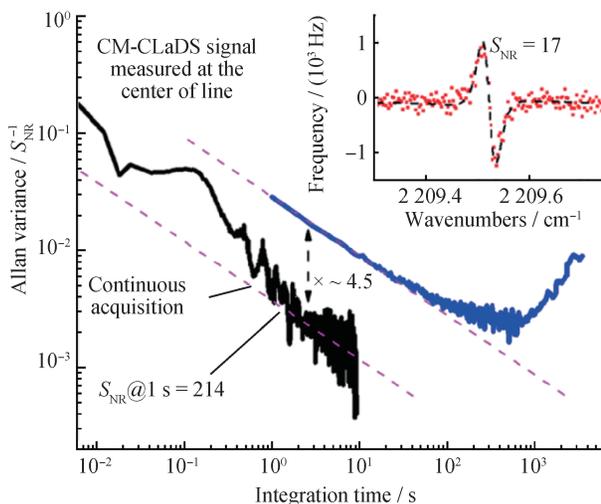
国际上，WYSOCKI G等人基于CLaDS技术发展了调制啁啾色散光谱技术(Chirp Modulation-CLaDS, CM-CLaDS)^[34]，如图8所示，该研究团队在扫描电流上添加额外的kHz级调制电流，并在解调端通过额外的带通滤波器提取二次谐波信号，将检测频率提升至kHz级，提升了测量灵敏度，结合线性锁定模式下使用单个光谱点连续监测样品浓度，可实现光学厚状态即高吸光度下的浓度测量，且无需光谱拟合。研究人员将该技术拓展应用到不同中红外光谱指纹识别区^[25, 39]。此外，MARTÍN-MATEOS P结合光频梳(Optical Frequency Comb, OFC)与啁啾色散光谱技术，在同波段下将CH₄的检测灵敏度提升了11倍^[40]。

国内，LDS技术的研究进展也非常迅速。香港中文大学HU M等人提出了一种新型的外差相敏色散光谱技术——外差相敏式波长调制色散光谱技术^[35]，如图9所示。通过在传统HPSDS技术的调制信号中添加额外的kHz级调制信号，并对应在接收端进行二次解调，极大降低了低频噪音影响，将探测灵敏度提高了近10倍。

武汉理工大学周晨等人系统研究了电光调制器的工作特性和近红外分布式反馈激光器的调制特性，原创了双边带拍频抑制的HPSDS技术，通过优化EOM偏置电压，提高了色散相位信号的信噪比、大幅度抑制边带噪音，使得信号不再畸变。如图10(a)所示，双边带拍频抑制的HPSDS技术具有线性度高($R^2 = 0.9999$)的优势，相较同测量系



(a) CM-CLaDS系统示意图
(a) Schematic diagram of CM-CLaDS system



(b) CLaDS (蓝)与CM-CLaDS (黑)的Allan Deviation对比
(b) Allan deviation comparison between CLaDS (Blue) and CM-CLaDS (Black)

图8 CM-CLaDS系统图及与CLaDS的Allan Deviation对比^[34]
Fig.8 CM-CLaDS system diagram and Allan deviation comparison with CLaDS^[34]

统下的WMS技术具有更宽的检测动态范围，但检测灵敏度略低于WMS^[32]。

哈尔滨工业大学LOU X等人提出了基于色散光谱的多点气体传感方法，利用光纤光调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)技术优异的复用性能和高空间分辨力，有效地抑制了检索色散信号中的相位噪声，同时无需外差解调电路，使系统更简单紧凑^[41]；近期，该团队还提出了将吸收光谱技术与色散光谱技术相结合的激光矢量光谱(Laser Vector Spectroscopy, LaVS)技术，同时利用了吸收光谱在低浓度区域的高灵敏度和色散光谱在高浓度区域的高线性度，将动态检测范围拓宽至10⁷量级^[36]，如图10(b)所示。

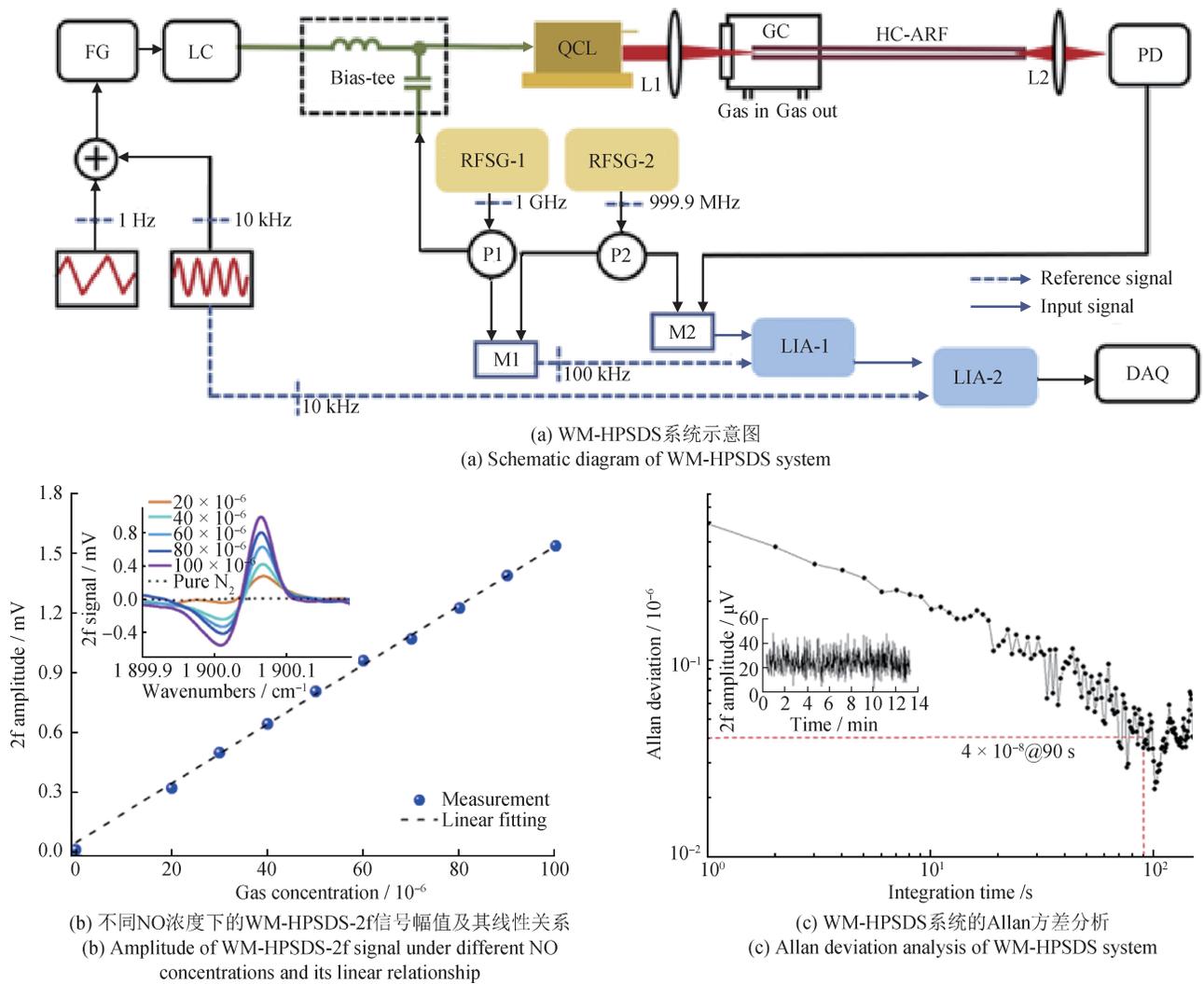


图9 WM-HPSDS系统示意图、检测线性度与灵敏度结果^[35]

Fig.9 Schematic diagram of WM-HPSDS system, and results of detection linearity and sensitivity^[35]

新兴光源也被应用于HPSDS技术中，差频产生(Different Frequency Generation, DFG)技术通过非线性过程将近红外光信号降频到中红外波段，MARTÍN-MATEOS P等人将经过EOM强度调制后的近红外光降频至中红外作为光源，实现了高精度检测^[37]，如图10(c)所示。利用差频源可以避免直接调制中红外量子级联激光器时存在的一些问题，得到的低检测极限证实了该系统在短光程的检测能力。

前期LDS技术展现出免疫一定范围内的光功率波动，如图11所示，其中，CLaDS技术可达到亚nw级光强下的高保真测量^[23]，HPSDS技术具有 μw 级的光功率波动免疫阈值^[32]。但目前针对探测器接收光功率波动的免疫阈值范围或理论阈值尚

未有进一步的研究。

2.2 色散光谱分析模型研究

色散光谱信号中的相位信息与温度和气体组分浓度密切相关，以HPSDS检测气体浓度为例，通过标定色散相位信号峰峰值与浓度和气体浓度的关系，可以实现气体浓度的定量检测。当温度变化时，多普勒展宽的变化会导致色散相位特征峰峰值变化，依据标定曲线获得的气体浓度值将失真；当混合气体成分复杂，目标气体以外气体浓度变化剧烈时，碰撞展宽的变化导致特征信号峰峰值变化，进一步加剧浓度数据失真。因此，发展高精度、强普适性的色散光谱模型是实现复杂场景、多变工况下高保真气体参数检测的关键。

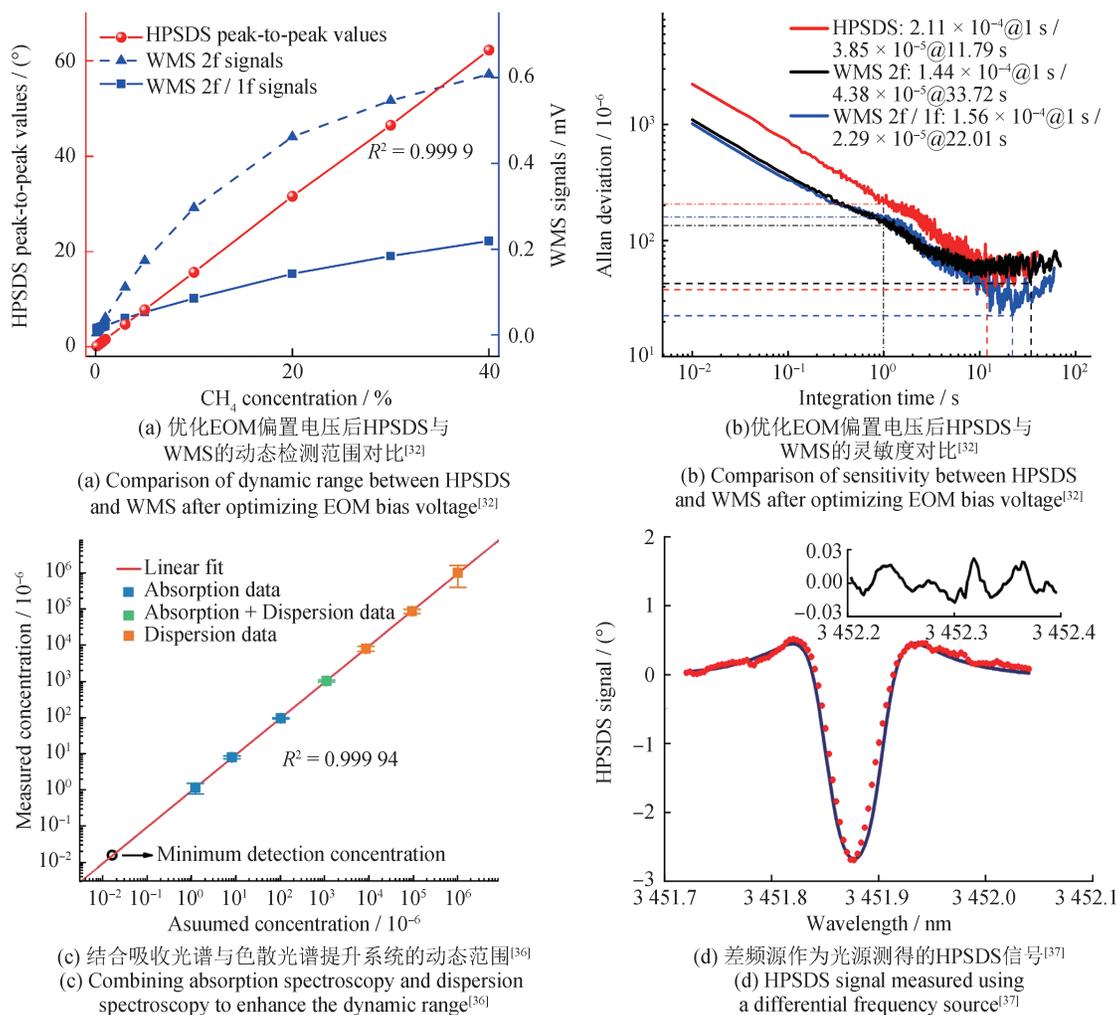
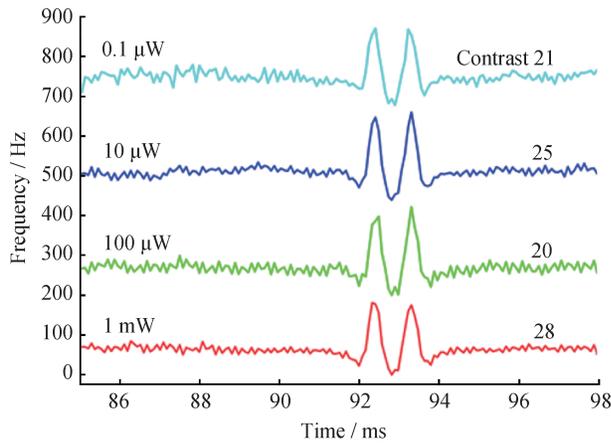


图10 HPSDS系统性能提升研究

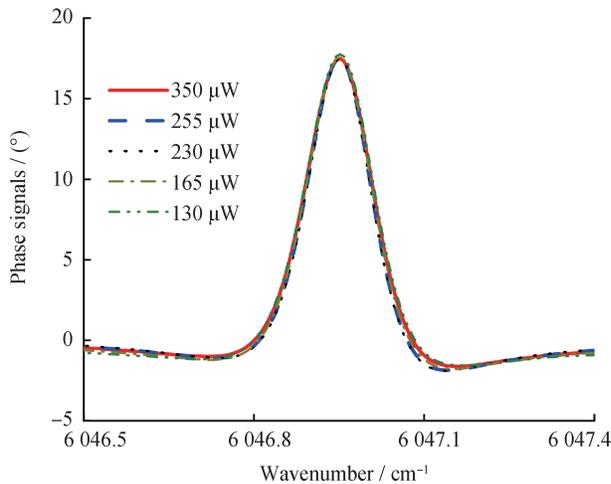
Fig.10 Research on HPSDS system performance improvement

普林斯顿大学 WYSOCKI G 等人发展了 CLaDS 技术的光谱分析模型，通过拟合量子级联激光器测量的高分辨力光谱信号反演气体浓度信息^[23]。MARTÍN-MATEOS P 团队建立了近红外纯强度调制的 HPSDS 分析模型，利用 VCSEL 进行了验证，同时验证了色散光谱信号对探测器接受功率波动免疫的显著优势^[28]。香港中文大学 WANG Z 等人建立了基于中红外量子级联激光器的 HPSDS 分析模型，实现了 N₂O 浓度的免标定反演^[30]；该课题组 MA L 等人前期面向非线性调谐特性更强的中红外 ICL 建立了色散光谱理论分析模型，实现了 CO₂ 的免标定测量^[19]。清华大学 WANG W 等人基于中红外带间级联激光器，建立了具有参数校准和表征过程的 HPSDS 详细数学模型，为精确的光谱拟

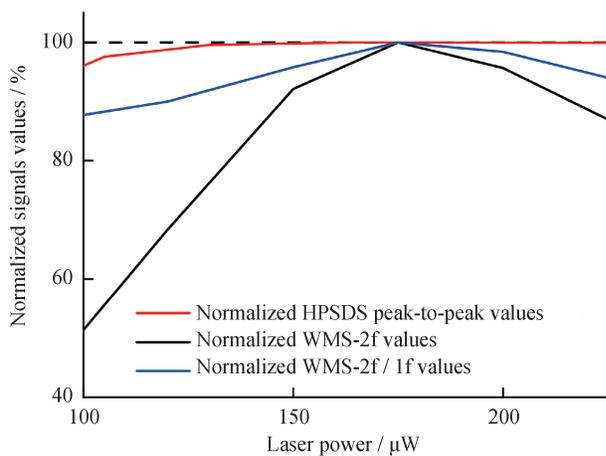
合、参数推断、中红外 HPSDS 以及其他相位检测技术的进一步发展奠定了基础^[38]。澳大利亚国立大学 WONG J 等人提出了一种利用码分复用来合成具有线性化集成波长与噪声抑制的色散光谱测量技术，基于 Voigt 函数研发了免标定光谱模型，并实现了 HCN 浓度的定量测量^[42]。武汉理工大学 ZHOU C 等人详细分析了直接电流调制与 EOM 外部调制时激光光场的详细特性〔如图 12(a) 所示〕、三色光束与物质作用的数理分析模型与拍频信号的数学模型，通过数值仿真证明了所提出的免标定策略在噪音环境中实现气体传感的可行性，随后采用直接电流调制与 EOM 外部调制 2 种方法，在近中红外波段进行了实验验证^[22]〔如图 12(b) 所示〕。



(a) 不同光功率水平对CLaDS信号的影响^[23]
(a) Influence of different optical power levels on CLaDS signals^[23]



(b) 不同光功率水平对HPSDS信号的影响^[32]
(b) Influence of different optical power levels on HPSDS signals^[32]



(c) 不同光功率水平对HPSDS和WMS信号影响的对比^[32]
(c) Comparison of the influence of different optical power levels on HPSDS and WMS signals^[32]

图 11 光功率水平对光谱信号的影响

Fig.11 Influence of optical power levels on spectral signals

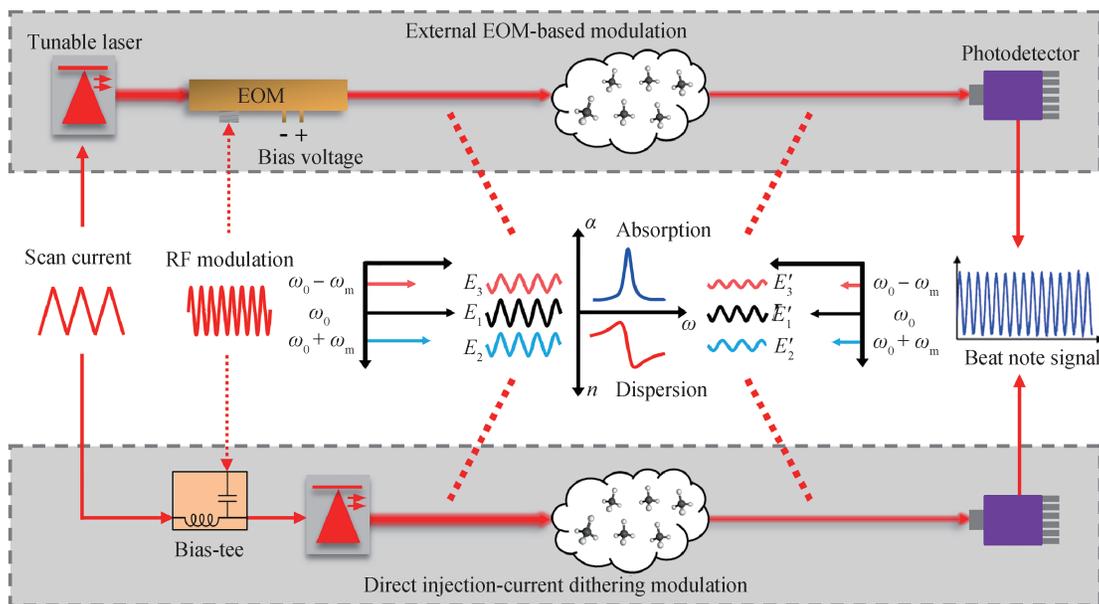
3 激光色散光谱技术应用研究

近十年,国内外学者针对LDS领域开展了大量的应用基础研究工作,LDS具有高灵敏度、优良的选择性、较短的检测时间和非侵入式的测量方式等优点,该方法在燃烧诊断研究、高温烟气研究、环境气体传感、同位素分析中均有应用,如表1所示。由于色散相位信号对仪器自身噪音和光电探测器接收到光功率波动有着强免疫的显著优势,该方法在高温气体参数测量中受到极大重视。

3.1 燃烧诊断研究

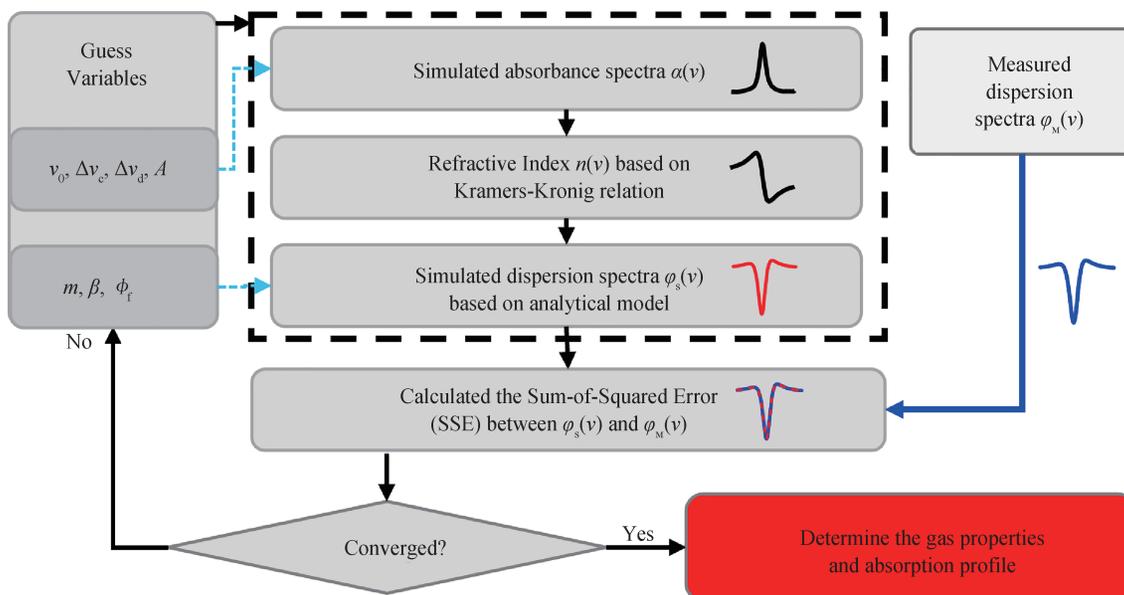
LDS技术在燃烧场温度和组分测量^[18-19]、高温烟气痕量组分检测^[21]中展现出免疫一定范围光功率衰减和火焰辐射的显著优势,但免疫功率波动的阈值范围仍有较大提升空间。深入研究LDS燃烧诊断理论,推动适用于现场复杂恶劣环境的燃烧诊断技术具有重要意义。

香港中文大学MA L等人首次演示HPSDS技术在燃烧环境中同时测量温度和水浓度的实验^[18],在sub-GHz到GHz调制频率下,采用2个经直接电流调制的QCL进行色散测量并检测外差相位信号,QCL利用5.27 μm和10.53 μm附近的2条低态能量差较大的强H₂O线以实现浓度和温度的高灵敏度测量,在1 000~3 000 K的温度范围内,2种水色散光谱的峰峰比与温度呈单调关系。该研究团队还验证了激光色散双线测温法推断火焰温度的方法。实验测量了不同当量比($\Phi=0.8\sim 1.2$)下CH₄/空气火焰的温度,与相应的热电偶测量结果吻合良好,基于一维动力学建模和详细的化学动力学机制(GRI 3.0)分析得到的模拟结果与HPSDS测量的水浓度测量结果吻合较好。最后,通过测量不同入射激光功率下的色散光谱,证明了HPSDS不受激光功率波动的影响,并推进了该方法在燃烧系统中的多组分测量和非均匀反应流表征中的应用。MA L等人基于4.2 μm中红外带间级联激光器发展了HPSDS技术,如图13所示,在国际上首次测量了层流预混CH₄/空气碳烟火焰中4条 ν_3 基波段的CO₂谱线的HPSDS信号^[19],测量结果与TDLAS测量结果一致性良好。该研究团队通过



(a) 不同调制方法下调制光场的分析原理图

(a) Analysis schematic of modulated E-field under different modulation methods



(b) 免标定HPSDS光谱拟合策略

(b) Calibration-free HPSDS spectral fitting strategy

图12 不同调制方法下调制光场的分析原理图及HPSDS免标定光谱拟合策略^[22]

Fig.12 Analysis schematic of modulated E-field under different modulation methods and HPSDS calibration-free spectral fitting strategy^[22]

实验验证了激光功率波动的抗扰性，并将其应用于 C_2H_2 /空气烟尘火焰 ($\Phi = 1.78 \sim 2.38$) 中 CO_2 浓度的定量测量。结果表明：色散测量与 TDLAS 测量的不确定度基本相同，证实了色散光谱对燃烧环境中光束转向、热辐射和碳烟散射引起的激光功率波动具有内在免疫的显著诊断优势。

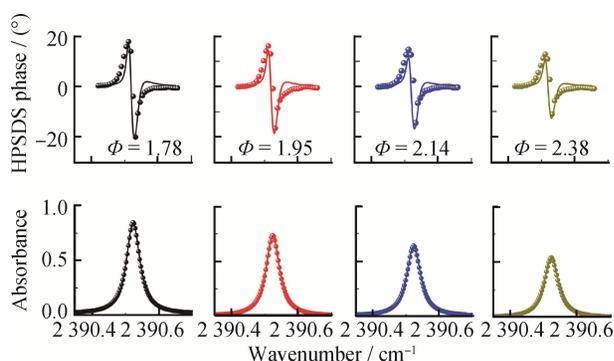
北京航空航天大学 WANG R 等人^[49]研发了对载波相位变化免疫的 HPSDS 技术，结合模拟退火算法实现了火焰温度和 H_2O 浓度的同步检测，并应用于远距离测量^[31]。此外，该课题组结合频分复用技术与 LDS 技术实现了动态燃烧环境下水汽温度的高精度测量(如图 14 所示)。采用 2 个电光

表1 激光色散光谱技术基础研究与应用研究总结

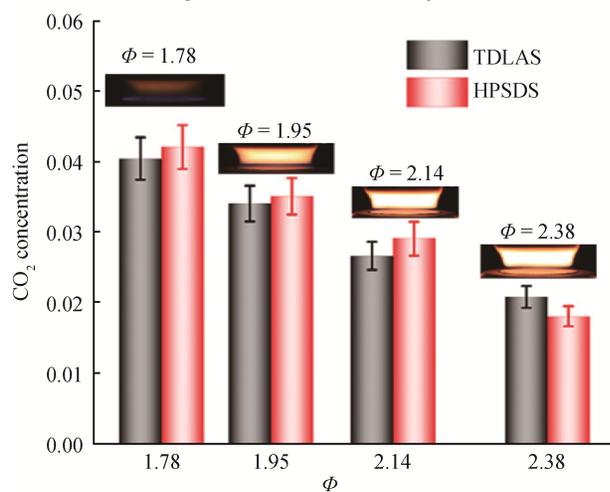
Tab.1 Summary of fundamental research and application research on laser dispersion spectroscopy technology

检测技术	调制方法	测量物种	激光波长	光源类型	测试环境	免标定	主要特点	检测限 / (10 ⁻⁶ ·m)	参考文献
CLaDS	AOM	NO	5.2 μm	QCL	5 Torr 15 cm 气体池	否	首次提出了CLaDS技术	6.21	[23]
	AOM	N ₂ O	4.52 μm	QCL	300 Torr 10 cm 气体池	否	提出了CM-CLaDS技术,显著降低解析频谱所需的RF检测带宽	0.071	[34]
	AOM	CH ₄	1.65 μm	DFB	大气环境 >35 m 开放光路	否	实现了10 ⁻⁶ 量级下CH ₄ 远距离测量	0.7	[39]
	AOM	N ₂ O	4.53 μm	QCL	大气环境 >71 m 开放光路	否	实现了大气中10 ⁻⁹ 量级下N ₂ O测量	0.015	[24]
	AOM	N ₂ O	4.52 μm	QCL	60 Torr 15 cm 气体池	否	实现了高吸光度下的气体传感		[25]
	AOM	O ₂	761 nm	DFB	36.6 m 气体池	否	首次在可见光波段利用色散光谱技术实现了O ₂ 泄漏检测	2.13 × 10 ⁴	[43]
HPSDS	EOM	CH ₄	1.65 μm	VCSEL	2 150 Torr 7 cm 气体池	是	首次提出了EOM-HPSDS技术	11.7	[26]
	EOM	CH ₄	1.65 μm	DFB	常压 4.5 cm 气体池	否	利用双边带所产生的拍频信号的相位进行气体浓度检测	0.4	[44]
	DICM	CO	4.59 μm	QCL	变压力 100 m 气体池	否	首次提出了DICM-HPSDS技术	2.25	[27]
	DICM	H ₂ O	5.27 μm 10.53 μm	QCL	McKenna 甲烷/ 空气预混火焰	否	首次通过HPSDS技术同时检测火焰中的温度和H ₂ O		[45]
	DICM	CO ₂	4183 nm	ICL	McKenna 乙烯/ 空气预混火焰	否	首次通过HPSDS实现了火焰温度和CO ₂ 浓度原位定量测量		[19]
	DICM	NO	5.26 μm	QCL	35 cm 空芯光纤	否	利用HPSDS技术在中红外空芯光纤中实现了气体传感	0.28 0.014	[46] [35]
	DICM	NH ₃	9.06 μm	QCL	573 K / 100 Torr 95 cm 气体池	否	利用HPSDS技术测量高温烟气中的氨逃逸	66.5	[21]
	DICM	N ₂ O	4.5 μm	QCL	200 Torr 10 cm 气体池	是	提出了QCL直接电流调制下的光谱模型	1.6	[30]
	DICM	CO	4.85 μm	ICL	McKenna 甲烷/ 空气预混火焰	否	通过HPSDS实现了火焰温度和CO浓度原位定量测量		[38]
	DICM	¹³ C/ ¹⁸ O	4.33 μm	ICL	230 mbar 1 m 气体池	否	利用HPSDS技术测量CO ₂ 同位素	¹³ C-0.89% ¹⁸ O-0.88%	[47]
EOM + DICM	CH ₄ 、N ₂ O、NO等	红外波段	DFB QCL	多测试环境	是	提出了一种适应多波段、多调制方法的通用光谱模型与免标定方法		[22]	
EOM	H ₂ O	1.392 μm 1.343 μm	DFB	McKenna 甲烷 空气预混火焰/ 旋流燃烧室	否	结合HPSDS与频分复用技术,实现了旋流火焰的温度测量		[48]	

调制器分别对中心波长为 $1.343 \mu\text{m}$ 与 $1.392 \mu\text{m}$ 的 2 束激光进行不同频率的高频强度调制, 调制后的 2 束光通过光纤合束器后沿着同一条光路穿过待测火焰, 再由 2 组混频器与锁相放大器对 2 种调制频率的拍频信号进行降频解调, 提取出 2 个波段范围内对应的 H_2O 色散相位信号, 根据两者峰峰值之比推演出火焰温度^[48]。近期, 该课题组通过多谱线色散光谱技术实现了轴对称层流火焰 LOS 温度分布重构, 将多光谱测温与外差相敏色散光谱技术相结合, 选择最佳色散谱线对, 用于测量非均匀温度分布, 并实现了沿激光路径非均匀温度分布的重建, 该方法克服了宽调谐激光器光功率波动较大的挑战, 证实了多谱线色散光谱技术在测量非均匀火焰温度等



(a) HPSDS 技术测量不同当量比的层流预混火焰的原始信号
(a) Raw signals of laminar premixed flames with different equivalence ratios measured by HPSDS



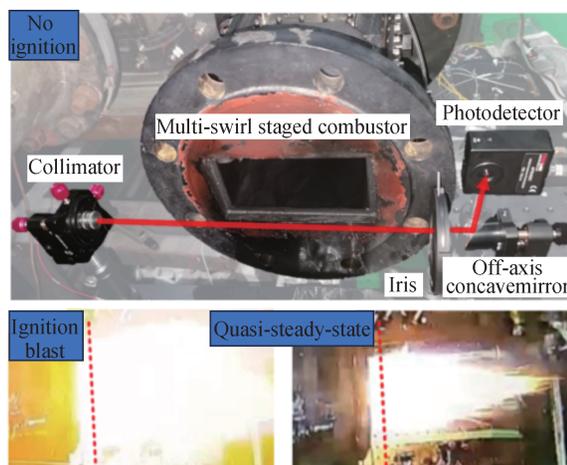
(b) WM-HPSDS 系统示意图
(b) Schematic diagram of WM-HPSDS system

图 13 利用 HPSDS 技术测量层流预混火焰中的 CO_2 浓度^[19]

Fig.13 Measurement of CO_2 concentration in laminar premixed flames using HPSDS^[19]

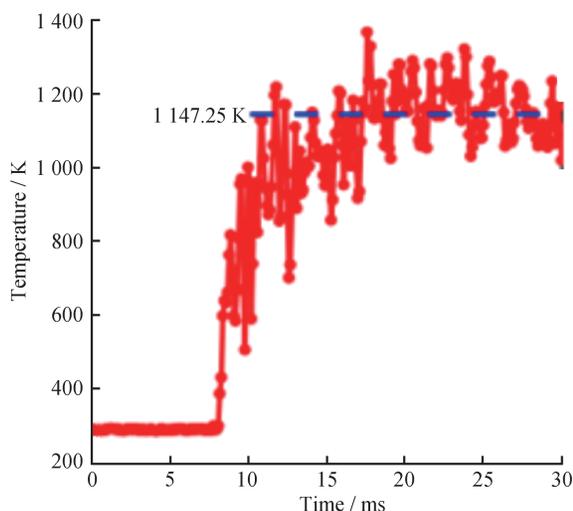
应用中具有较大潜力^[50]。

清华大学 WANG W 等人基于中红外 HPSDS 技术开发了温度和 CO 浓度测量系统(如图 15 所示), 采用数字锁相放大器克服了硬件带宽限制, 提供了更高的时间分辨率和更灵活的实验设置, 在不同当量比的层流预混甲烷/空气火焰中进行了验证, 并与其他技术的测量结果进行了横向对比, 评估了测量火焰时 HPSDS 技术的信噪比与不确定性等因素^[38]。



(a) 采用 HPSDS 测量多级旋流燃烧室出口温度, 分别在未点火、点火爆炸、准稳态时的光路示意图

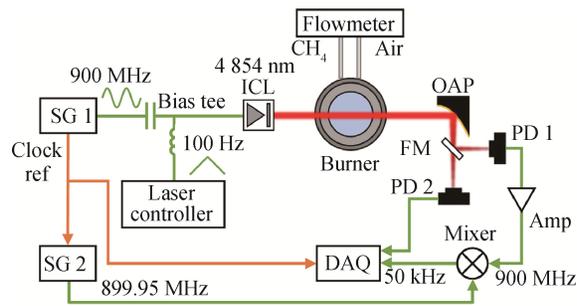
(a) Schematic diagram of the optical path for measuring the exit temperature of multi-swirl staged combustor using HPSDS under the conditions of no ignition, ignition blast and quasi-steady-state



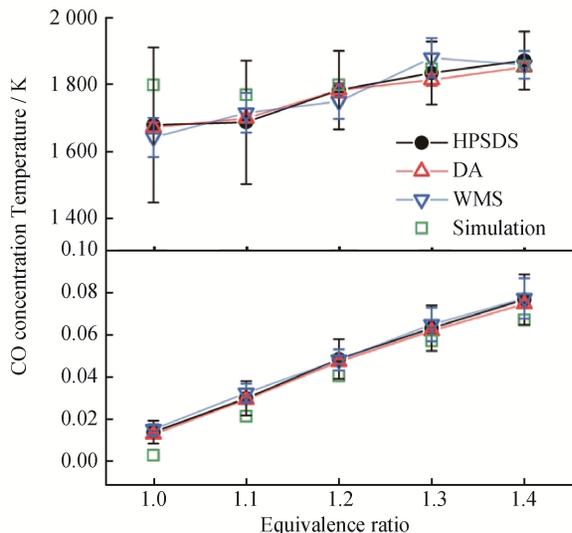
(b) 从点火爆炸到准稳态期间温度随时间的变化关系
(b) Relationship between temperature and time from ignition blast to quasi-steady-state

图 14 激光色散光谱技术应用于大功率燃烧系统温度测量^[48]

Fig.14 Application of LDS in temperature measurement of high power combustion system^[48]



(a) 基于HPSDS的层流火焰温度与CO浓度测量系统示意图
(a) Schematic diagram of laminar flame temperature and CO concentration measurement system based on HPSDS



(b) HPSDS与其他技术测得的温度与CO浓度结果对比
(b) Comparison of temperature and CO concentration results measured by HPSDS and other technologies

图 15 HPSDS 技术测量不同当量比下层流预混火焰的温度和 CO 浓度^[38]

Fig.15 Temperature and CO concentration measurements of laminar premixed flames with different equivalence ratios by HPSDS^[38]

3.2 高温烟气检测研究

激光吸收光谱由于其定量测量、快速响应、高灵敏度、使用方式简单而被广泛应用于燃烧诊断。但在实际应用中，激光吸收光谱测量会受到激光功率波动、粒子散射和热辐射等影响。色散光谱利用分子共振附近伴随吸收的折射率变化，从与折射率相关的测量光学相位信号中获取，不会受到非共振吸收或散射效应引起的激光功率波动的影响^[19]。同时，大多数气体分子在中红外区域具有更强的吸收带，中红外光的强度调制可以通过直接调制半导体激光器的注入电流来实现，从而将色散光谱测量应用扩展到中红外区域并达

到更低的检测下限^[23]。

香港中文大学DUAN K等人采用量子级联激光器开发了高温烟气痕量NH₃逃逸检测的LDS传感器^[21]，如图16所示，该传感器的检测下限达到7 × 10⁻⁸。该研究团队还提出了一种新的免校准外差相敏色散光谱测量方法以及分析模型，通过数值实验与实际实验进行验证有效性，并拟合9.06 μm附近的多谱线色散光谱，进一步验证了在高温环境下测量NH₃浓度的方法。

不同于传统的波长扫描式的HPSDS技术，MARTÍN-MATEOS P等人利用高速线锁定技术将HPSDS技术拓展至丙烷点火时的CO浓度检测^[51]，如图17所示。该技术将激光波长锁定于色散相位信号最强(即光谱特征中心)时的波长，建立色散相位信号与气体浓度的直接关系，此时任意时间下系统检测到的色散相位信号即对应着浓度信息。该方法滤除了波长扫描HPSDS中最强特征之外的色散相位信号，极大地提高了系统响应速度，特别适用于燃烧诊断、排放检测、大气痕量气体监测等高速检测应用场景。

3.3 环境光学痕量气体检测研究

与测量光强变化的激光吸收光谱法相比，相位检测色散光谱法具有零背景和大动态范围等优点。此外，对光强度波动的固有免疫力也使得色散光谱对痕量气体传感应用具有吸引力。

WYSOCKI G和NIKODEM M基于CLaDS技术搭建了基于开放式光路的光学测量系统，用于大气N₂O实时监测(如图18所示)。在连续5天的测试中，成功捕捉到了数次降雨后土壤中硝化过程与反硝化过程所导致的N₂O浓度上升的现象^[24]。清华大学DING W等人^[44]发展了相敏式激光啁啾色散光谱技术，实现了高吸收光度情况下的气体测量。香港中文大学HU M等人利用外差相敏色散光谱技术，通过空心光纤增强光与气体间的相互作用，不仅实现了NO的高灵敏检测，还显著提升了装置紧凑性^[35, 46]。

南昌航空航天大学ZHANG H等人采用直接电流调制方法，搭建了基于DFB激光器的用于CH₄检测的近红外HPSDS传感器，并与波长调制光谱进行了实验比较，以评估这2种方法的动态范围、长

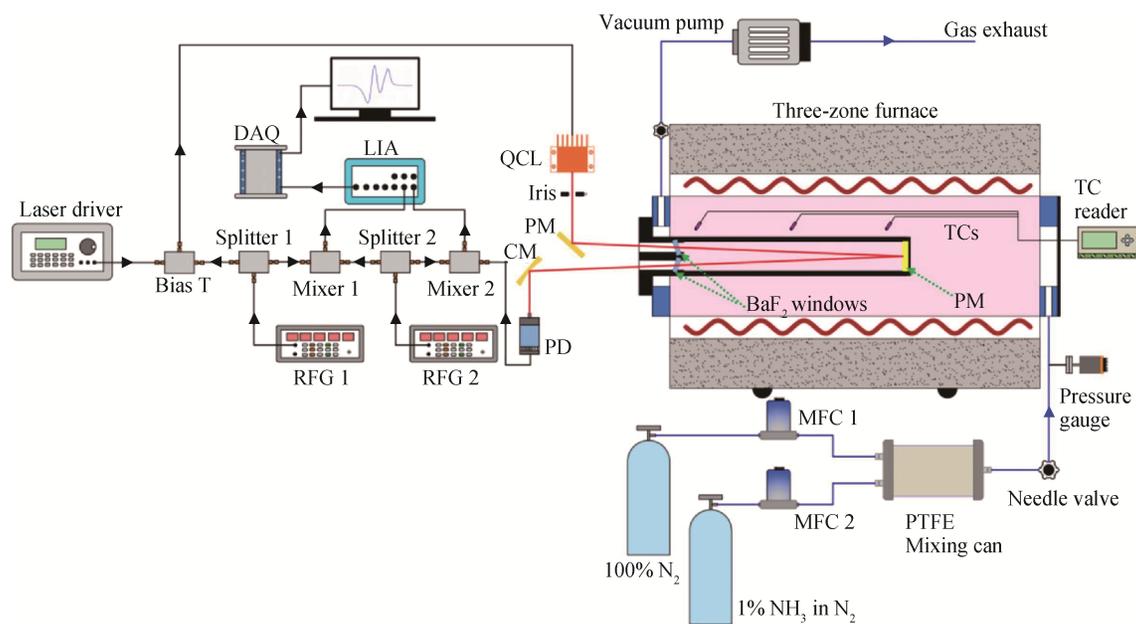
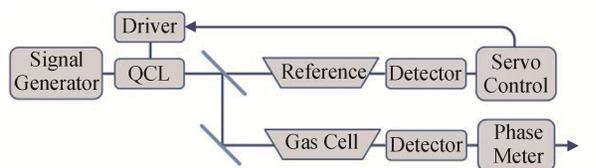


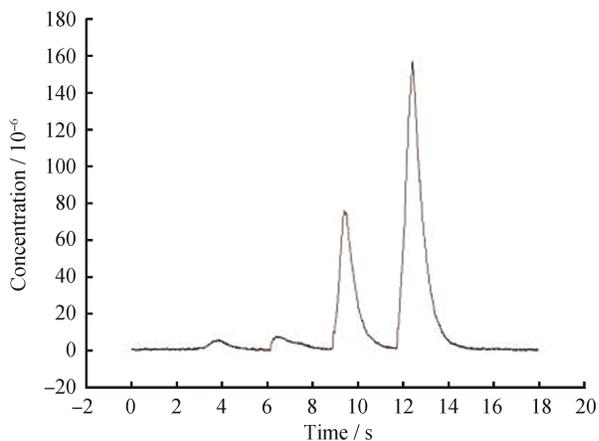
图 16 激光色散光谱技术应用于高温烟气检测^[21]

Fig.16 Application of LDS in high temperature flue gas detection^[21]



(a) 高速线锁定HPSDS系统简图

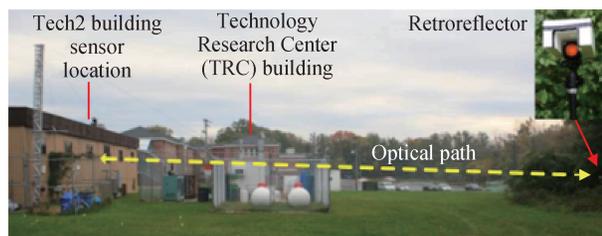
(a) Schematic diagram of high-speed line-locked HPSDS system



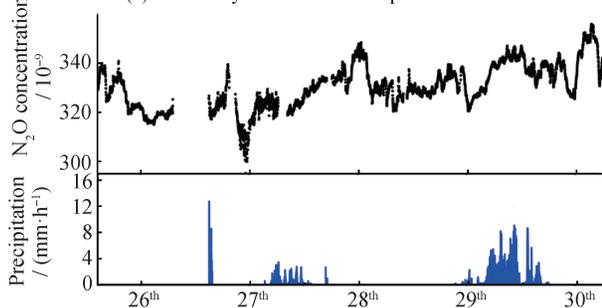
(b) 实测丙烷点火时的CO浓度检测结果
(b) Measurement result of CO concentration during propane ignition

图 17 检测丙烷点火时CO浓度的高速线锁定HPSDS系统^[51]
Fig.17 High-speed line-locked HPSDS system for detecting CO concentration during propane ignition^[51]

期稳定性和精度极限^[47]。该研究团队还基于直接电流调制的HPSDS技术实现了中空波导(Hollow Waveguide, HWG)光纤中CO₂同位素比率(¹³C/¹²C



(a) 开放环境中搭建的CLaDS实验系统
(a) CLaDS system built in an open environment



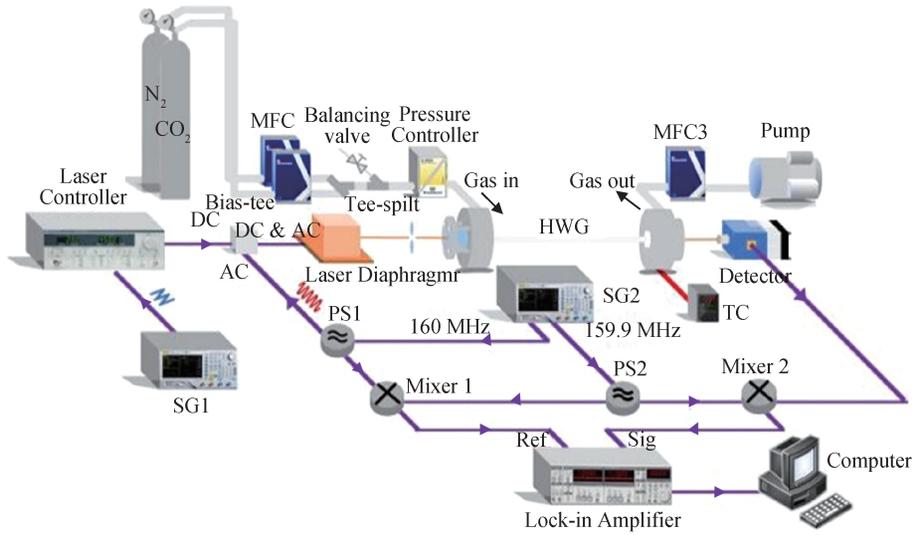
(b) 连续5天系统监测的N₂O浓度及同时段的降雨量
(b) N₂O concentration monitored by the system for 5 consecutive days and precipitation during the same period

图 18 CM-CLaDS技术应用于大气N₂O监测^[24]

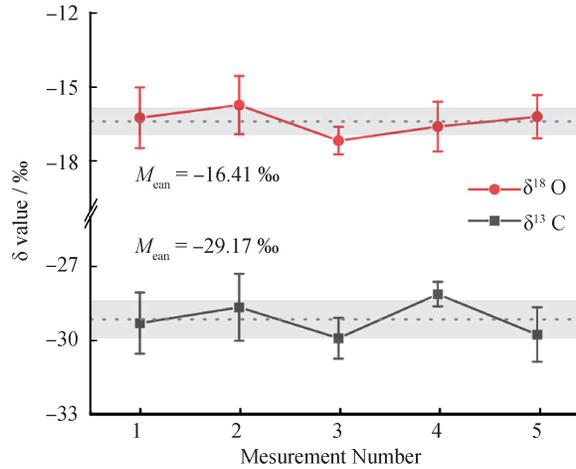
Fig.18 Application of CM-CLaDS in N₂O monitoring^[24]

和¹⁸O/¹⁶O)的测量,如图19所示。通过与WMS技术的对比研究发现:基于HPSDS的气体检测系统具有更大的线性动态范围和优异的长期稳定性^[47]。

2024年,波兰弗罗茨瓦夫理工大学NIKODEM M团队基于CLaDS技术衍生出的差分色散光谱技术(Differential Optical Dispersion Spectroscopy, DODiS),



(a) 基于HPSDS技术的CO₂同位素检测系统
(a) CO₂ isotope detection system based on HPSDS technology



(b) HPSDS系统实际测量的CO₂中的同位素比率
(b) Isotope ratio in CO₂ measured by HPSDS system

图19 HPSDS技术应用于同位素检测^[47]

Fig.19 Application of HPSDS in isotope detection^[47]

选用O₂位于760 nm波段附近的光谱特征，实现了环境中O₂泄漏检测^[43]。如图20所示，当检测到N₂泄漏时，开放气室中的O₂浓度下降，此时色散信号的峰值频移为正；当检测到O₂泄漏时，开放气室中O₂浓度上升，峰值频移为负。所搭建的DO-DiS测量系统可以检测10⁻⁴到接近百分百浓度下的O₂变化，同时具有无需背景信号、不受光功率波动、在厚光学条件下(吸光度 > 0.30)线性度依旧良好等优势。

4 结论与展望

本文对LDS技术的发展现状进行了综述，从

LDS技术研究进行气体参数测量的动机展开，着重介绍了色散光谱测量的2种典型实现方法、提升色散光谱技术性能提升的基础研究、免标定色散光谱分析模型的发展历程与LDS技术在各类场景中的应用。

尽管基于LDS的气体传感技术在宽动态检测范围和对接收光功率免疫特性方面展现了优异的测量性能和出色的应用潜力^[23, 32]，但是目前的研究存在诸多局限性：① 在应用波段上，LDS的研究主要集中在近中红外波段，针对紫外波段的研究较少，且在中红外波段缺少成熟的商用强度调制器，因此大多数情况下采用直接电流调制方案，

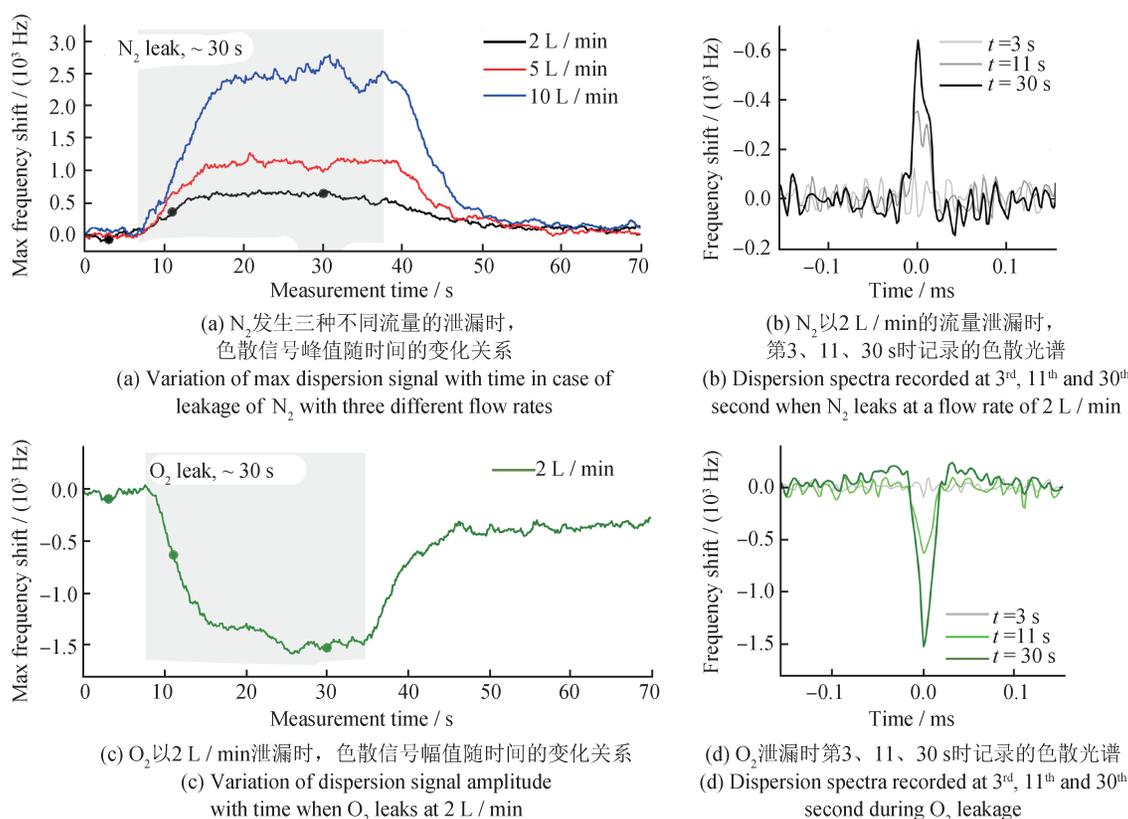


图 20 气体泄漏检测演示^[43]

Fig.20 Gas leak detection demonstration^[43]

会引入较强的频率调制影响^[27, 30]，提高了信号后处理的难度；② 在设备限制上，光电探测器的探测带宽限制了调制频率进而制约了系统性能^[32, 52]，此外需要利用射频电子器件对原始信号降频，导致信号解调系统相对复杂^[45]；③ 在检测性能上，各种额外器件引入的系统噪声对测量灵敏度产生了一定限制^[43]。

LDS 技术未来的发展趋势主要体现在充分融合先进调制解调技术与光谱技术的优势，紧密结合现代传感器及传感器设计工艺，发展宽动态范围、高灵敏度、强稳健性的检测方法。主要包括以下 5 个方面的内容：

1) 基于先进信号调制解调的色散相位检测方法
采用高速射频解调设备代替降频解调系统，实现 GHz 拍频信号或者宽频域谐波信号的高精度直接解调，降低系统复杂度，减少系统噪声，实现系统集成^[52]。

2) 腔增强色散光谱技术

利用吸收光谱技术中成熟的腔增强技术，将

光程增大数百至数千倍，结合高增益高带宽光电探测器与色散光谱抗光功率波动强的特性，实现具有宽动态范围(10^6 量级)、高灵敏度(10^{-13} 级)的气体浓度检测。

3) 紫外及中远红外色散光谱技术

大部分燃烧中间产物和大气污染物在此谱段内具有强吸收特征，结合先进光源(例如将强度调制器调制后近红外泵浦至中红外)探索色散光谱技术在宽波段范围内的更多应用可能性。

4) 多组分同步检测功能

利用宽带激光光源(如外腔半导体激光器)，结合频分或者时分复用技术实现对 CO 、 NO_x 等典型燃烧污染物的同步在线监测，实现复杂工业环境烟气检测等应用。

5) 非均匀燃烧流场诊断

结合先进层析成像技术充分利用已有高效高精度算法和光路布局，利用 LDS 本身对功率波动强免疫的优势，实现非均匀燃烧流场定量高保真测量。

参考文献

- [1] FAROOQ A, ALQUAITY A B, RAZA M, et al. Laser sensors for energy systems and process industries: perspectives and directions[J]. *Progress in Energy Combustion Science*, 2022, 91: 100997.
- [2] GOLDENSTEIN C S, SPEARRIN R M, JEFFRIES J B, et al. Infrared laser - absorption sensing for combustion gases[J]. *Progress in Energy Combustion Science*, 2017, 60: 132-176.
- [3] ROY S, GORD J R, PATNAIK A K. Recent advances in coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy: fundamental developments and applications in reacting flows [J]. *Progress in Energy Combustion Science*, 2010, 36 (2): 280-306.
- [4] SCHULZ C, SICK V. Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/ air ratio in practical combustion systems [J]. *Progress in Energy Combustion Science*, 2005, 31 (1): 75 -121.
- [5] 刘晶儒, 胡志云. 基于激光的测量技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. *中国光学*, 2018, 11(4): 531-549.
LIU J R, HU Z Y. Applications of measurement techniques based on lasers in combustion flow field diagnostics [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2018, 11 (4): 531-549. (in Chinese)
- [6] CAI W, KAMINSKI C F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows [J]. *Progress in Energy Combustion Science*, 2017, 59: 1-31.
- [7] LIU C, MCCANN H, XU L. Perspectives on instrumentation development for chemical species tomography in reactive - flow diagnosis [J]. *Measurement Science Technology*, 2023, 34(12): 121002.
- [8] 曹章, 高欣, 陆方皞, 等. 激光吸收光谱层析成像及复杂燃烧场动态监测[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 117-138.
CAO Z, GAO X, LU F H, et al. Laser absorption spectral tomography for dynamical combustion monitoring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 117-138. (in Chinese)
- [9] 洪延姬. 燃烧场吸收光谱诊断技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2014, 28(3): 12-25.
HONG Y J. Progress in absorption spectroscopy diagnosis techniques for combustion flowfields [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(3): 12-25. (in Chinese)
- [10] 阚瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 等. 激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 67-82.
KAN R F, XIA H H, XU Z Y, et al. Research and progress of flow field diagnosis based on laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45 (9): 67-82. (in Chinese)
- [11] 李金义, 赵航, 杨晓涛, 等. 激光吸收光谱2D和3D成像测量技术及其应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(19): 71-84.
LI J Y, ZHAO H, YANG X T, et al. Research and application progress on laser absorption spectroscopy technology for 2D and 3D imaging measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59 (19): 71-84. (in Chinese)
- [12] 王海青, 林伟, 仝毅恒, 等. 基于激光的燃烧场温度诊断方法综述[J]. *气体物理*, 2020, 5(1): 42-55.
WANG H Q, LIN W, TONG Y H, et al. Review of laser based temperature diagnosis methods for combustion field [J]. *Physics of Gases*, 2020, 5 (1): 42-55. (in Chinese)
- [13] 朱家健, 万明罡, 吴戈, 等. 激光诱导荧光技术燃烧诊断的研究进展[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48 (4): 0401005.
ZHU J J, WAN M G, WU G, et al Research progress of laser induced fluorescence technology in combustion diagnostics [J] *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48 (4): 0401005. (in Chinese)
- [14] DEMTRÖDER W. *Laser spectroscopy 1: basic principles* [M]. Springer, 2014.
- [15] DEMTRÖDER W. *Laser spectroscopy 2: experimental techniques* [M]. Springer, 2015.
- [16] MRKVIČKOVÁ M, DVOŘÁK P, SVOBODA M, et al. Dealing with saturation of the laser-induced fluorescence signal: an application to lead atoms [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 241: 112100.
- [17] SUN K, CHAO X, SUR R, et al. Analysis of calibration-free wavelength-scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers [J]. *Measurement Science Technology*, 2013, 24 (12): 125203.
- [18] MA L, WANG Z, CHEONG K P, et al. Temperature and

- H₂O sensing in laminar premixed flames using mid-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124: 1–7.
- [19] MA L, WANG Z, CHEONG K-P, et al. Mid-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy in flame measurements [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(2): 1329–1336.
- [20] TOLL J S. Causality and the dispersion relation: logical foundations [J]. *Physical Review*, 1956, 104 (6) : 91–111.
- [21] DUAN K, HU M, JI Y, et al. High-temperature ammonia detection using heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy at 9.06 μm [J]. *Fuel*, 2022, 325: 124852.
- [22] MA L, ZHOU C, WANG Z, et al. Calibration-free heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy: quantitative gas sensing and recovery of absorption spectra [J]. *Optics Express*, 2024, 32(21): 37492–37515.
- [23] WYSOCKI G, WEIDMANN D. Molecular dispersion spectroscopy for chemical sensing using chirped mid-infrared quantum cascade laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (25): 26123–26140.
- [24] NIKODEM M, WYSOCKI G. Chirped laser dispersion spectroscopy for remote open-path trace-gas sensing [J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 16466–16481.
- [25] NIKODEM M, WYSOCKI G. Measuring optically thick molecular samples using chirped laser dispersion spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3834–3837.
- [26] MARTÍN-MATEOS P, ACEDO P. Heterodyne phase-sensitive detection for calibration-free molecular dispersion spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (12) : 15143–15153.
- [27] MARTÍN-MATEOS P, HAYDEN J, ACEDO P, et al. Heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy in the mid-infrared with a quantum cascade laser [J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 89(11): 5916–5922.
- [28] PAUL S, MARTÍN-MATEOS P, HEERMEIER N, et al. Multispecies heterodyne phase sensitive dispersion spectroscopy over 80 nm using a MEMS-VCSEL [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2664–2668.
- [29] GAZIZOV I, PINTO D, MOSER H, et al. Absorption and dispersion: in search of a versatile spectroscopic technique [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025: 137688.
- [30] WANG Z, CHEONG K-P, LI M, et al. Theoretical and experimental study of heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy with an injection-current-modulated quantum cascade laser [J]. *Sensors*, 2020, 20 (21). DOI:10.3390/s20216176.
- [31] WANG R, XU L, HUANG A, et al. Simultaneous telemetry of temperature and vibration by laser dispersion spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3956–3959.
- [32] 周晨, 马柳昊, 王宇. 基于外差相敏色散光谱技术的宽动态范围甲烷气体检测 [J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 789–800.
- ZHOU C, MA L H, WANG Y. Measurement of methane concentration with wide dynamic range using heterodyne phase sensitive dispersion spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17 (4): 789–800. (in Chinese)
- [33] ZHANG H, WU T, WU Q, et al. Methane detection with a near-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectrometer at a stronger frequency modulation using direct injection-current dithering [J]. *Optics Express*, 2023, 31 (15): 25070–25081.
- [34] NIKODEM M, WEIDMANN D, WYSOCKI G. Chirped laser dispersion spectroscopy with harmonic detection of molecular spectra [J]. *Applied Physics B*, 2012, 109: 477–483.
- [35] HU M, REN W. Wavelength-modulation dispersion spectroscopy of NO with heterodyne phase-sensitive detection [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(11): 2899–2902.
- [36] LOU X, WANG Y, XU N, et al. Gas sensing with 7-decade dynamic range by laser vector spectroscopy combining absorption and dispersion [J]. *Photonics Research*, 2023, 11(10): 1687–1693.
- [37] MARTÍN-MATEOS P, JEREZ B, DE DIOS C, et al. Mid-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy using difference frequency generation [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124: 1–5.
- [38] WANG W, FU P, SONG Z, et al. Compact mid-infrared laser sensor for temperature and CO concentration measurement using heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy [J]. *Measurement*, 2025, 244: 116084.
- [39] NIKODEM M, PLANT G, SONNENFROH D, et al. Open-path sensor for atmospheric methane based on chirped laser dispersion spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2015, 119: 3–9.
- [40] MARTÍN-MATEOS P, JEREZ B, ACEDO P. Dual electro-optic optical frequency combs for multiheterodyne mo-

- lecular dispersion spectroscopy [J]. Optics express, 2015, 23(16): 21149–21158.
- [41] LOU X, WANG Y, DONG Y. Multipoint dispersion spectroscopic gas sensing by optical FMCW interferometry [J]. Optics Letters, 2021, 46(23): 5950–5953.
- [42] WONG J, BANDUTUNGA C P, SINGH P, et al. Molecular dispersion spectroscopy using a code-division-multiplexed optical carrier [J]. Physical Review Applied, 2023, 19(4): 044027.
- [43] GOMÓŁKA G, NIKODEM M. Gas leak detection by measuring dilution of ambient air with differential optical dispersion spectroscopy of oxygen [J]. Optics Express, 2024, 32(27): 48847–48857.
- [44] DING W, SUN L, YI L, et al. Dual-sideband heterodyne of dispersion spectroscopy based on phase-sensitive detection [J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 8698–8704.
- [45] MA L, WANG Z, CHEONG K-P, et al. Temperature and H₂O sensing in laminar premixed flames using mid-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy [J]. Applied Physics B, 2018, 124: 1–7.
- [46] HU M, VENTURA A, HAYASHI J G, et al. Trace gas detection in a hollow-core antiresonant fiber with heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 363: 131774.
- [47] ZHANG H, WU T, WU Q, et al. Measurement of CO₂ isotopologue ratios using a hollow waveguide-based mid-infrared dispersion spectrometer [J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(50): 18479–18486.
- [48] WANG R, XU L. High-precision temperature measurement using frequency-division multiplexing laser dispersion spectroscopy for dynamic combustion monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024.
- [49] WANG R, PANG Y, TANG X. Simultaneous measurement of temperature and water concentration using a novel laser dispersion spectrum extraction method immune to carrier phase variation [J]. Optics Lasers in Engineering, 2023, 164: 107497.
- [50] WANG R, XU L. Line-of-sight temperature profile reconstruction of axisymmetric laminar flame by multispectral dispersion spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, 2024. DOI: 10.1109/TIM.2024.3472775.
- [51] MARTÍN - MATEOS P, HAYDEN J, LENDL B, et al. High-speed line-locked heterodyne phase sensitive dispersion spectroscopy; proceedings of the 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)[C]// IEEE, 2018.
- [52] BONILLA-MANRIQUE O E, MORENO-OYERVIDES A, MÁNGUEZ - MARTÍN R, et al. Direct high-frequency modulation of a quantum cascade laser for high-sensitivity molecular dispersion spectroscopy at ambient pressure [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2024: 73. DOI:10.1109/TIM.2024.3476590.

(本文编辑：刘宇轩)



第一作者：周晨(2000—)，男，研究助理，硕士，主要研究方向为新型激光光谱气体传感技术和通用性激光色散光谱模型，现阶段主要从事基于色散-吸收光谱技术的气体传感方法研究及气体传感器设备研制。



通信作者：马柳昊(1990—)，男，武汉理工大学副教授，博士生导师，湖北省海外高层次人才项目“楚天学者”计划和“武汉英才”项目获得者。主要研究方向为激光色散光谱气体传感技术、新型激光光谱燃烧诊断方法及其在工业复杂恶劣现场中的应用。当前在激光吸收-色散光谱燃烧诊断及气体传感领域已发表学术论文50余篇，相关技术已应用于标准火焰温度测量、燃气灶具设计、零碳工业陶瓷窑炉烟气在线分析。作为项目负责人主持国家自然科学基金面上项目、青年基金、粤佛基金重点项目课题、佛山仙湖实验室重大项目课题以及多项企事业单位委托项目。