

基于远距离激光测振仪的痕量危险品探测

刘晓利, 王紫薇, 傅愉*

深圳大学物理与光电工程学院深圳市智能光测与感知重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 光声/光热光谱技术已经广泛应用于痕量危险化学品和爆炸物的探测,并显示出高效的探测能力。然而,该技术通常需要在光声池中进行分析,并使用高灵敏度麦克风或压电传感器记录振动信号,因此不适用于在安全距离外的开放环境中探测泄漏的危险物质或爆炸物。为此,利用强度调制的量子级联激光器(QCL)激发微量固体(聚四氟乙烯)和气体(丙酮)的光声效应,借助自主研发的远距离激光多普勒测振仪(LDV)对QCL产生的光振动信号进行检测。通过扫描QCL的波长,测量振动信号的幅值并获取光声光谱,其结果与傅里叶变换红外光谱的结果高度一致。实验结果表明,自制的远距离LDV可以在距离达200 m的开放环境下有效地检测痕量固态和气态化学品的光声信号。

关键词 干涉测量术; 光声效应; 激光多普勒测振仪; 振动分析

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230829

1 引言

快速检测和鉴别危险化学品,如痕量爆炸物和化工厂中泄漏的有害气体,对反恐和化工厂重大事故安全监测和检测至关重要。光声效应于1880年首次报道^[1],目前光声光谱学已广泛应用于许多固体^[2]、液体和气体^[3]的评估应用中。对于传统的光声光谱学,需要在受控环境中准备样品,并使用隔离的光声池进行测量,以消除外部干扰^[4]。样品需要进行前处理,然后暴露在经调制的高功率光束下,产生间歇性热膨胀效应,由此产生的声波信号被高灵敏度的传感器捕获,以便分析有关样品的成分和浓度。该技术在生物医学、化学和环境科学等领域获得广泛应用。Chen等^[5]利用高灵敏度麦克风和声音反射装置在开放环境中检测出量子级联激光器(QCL)激发的爆炸物产生的光声信号。为提高检测效率,Choa等^[6]应用了麦克风阵列和声音反射阵列装置。然而,由于声波在空气中进行传输时损耗非常大,在安全距离外的开放环境中进行光声光谱分析极具挑战性。近年来,研究人员致力于开发非接触光学检测技术以克服声学检测的局限,例如利用热成像和激光干涉测量技术实现对光声/光热信号的非接触检测,该技术克服了传统方法的缺点,有效提高了检测效率和灵敏度,并为光声光谱学更广泛的应用奠定了坚实的基础^[7]。

目前的研究主要关注在开放环境下无需样品制备的检测方法^[8]。Wynn等^[9]使用紫外光作为激发光源,

用远距离激光多普勒测振仪(LDV)探测1 m外的痕量爆炸物,达到了快速检测和区分炸药的效果。Marcus等^[10]利用距离爆炸物目标0.5 m处的QCL作为激发源,配合激光波长为1550 nm的连续波激光干涉系统,实现了5 m范围内的光声光谱检测。该实验中被测化学品在特定波长的激光激发下产生光声效应,通过探测激光的多普勒频移来获得样品的振动信号,从而实现非接触式的光声信号检测^[11]。Hu等^[12]实现了对聚四氟乙烯(PTFE)胶带上和液体表面上光振动信号的非接触检测。这种新型的光声光谱学可实现对目标物质的快速检测和识别,在环境监测、工业卫生及医学诊断领域具有广阔的应用前景^[13]。对于危险品及微量爆炸物的检测,远距离探测具有能够保障工作人员安全的优势,Fu等^[14]开发的LDV系统可以实现百米探测。光声光谱学也能够对气体进行探测,例如麻省理工学院的Lincoln实验室开发了一种名为DPAS的动态光声光谱技术,该技术可以通过便携式激光系统在数米外检测痕量气体^[15]。

本文利用自主研发的远距离激光多普勒系统,结合带有光学斩波器的可调谐QCL,首次实现了200 m远开放环境下对微量化学品光振动信号的探测。以常见的化学药品PTFE的微量粉末为样本进行测试,并在远距离下对管道泄漏的少量丙酮气体进行探测。所获光谱与目标物质对应的傅里叶变换红外光谱(FTIR)高度重合,表明自制的LDV是一种有效的光声光谱传感器,在气体泄漏和高危化学物质的远距离

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-05-04; 录用日期: 2023-05-29; 网络首发日期: 2023-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(11972235)、深圳市基础研究项目(JCYJ20220531101204010)

通信作者: *fuyuoptics@gmail.com

探测方面具有极高的应用潜力。

2 微量固体和气体化学物质的光声效应

当分子被周期性调制的电磁辐射所激发时,非辐射跃迁导致物质间歇性热膨胀,这个过程中会产生光声信号。QCL 诱导的光声效应技术可以用于检测微量固体和气态化学物质。在该类技术中,QCL 通过发射与分子振动频率匹配的特定波长来激发样品,样品受激后以特定频率发生膨胀收缩,产生光声信号。该信号以光程(OPL)变化的形式被激光干涉仪捕获,并把 OPL 变化转换成相应的振动幅度或速度,其频率对应于激发激光的调制频率,通过测量不同激发波长下化学品的振动幅度确定样品中物质的成分。

QCL 诱导的光声效应技术具有高灵敏度和选择性,它只响应与激发激光波长匹配的化学物质的振动,在特定气体的检测中具有高度灵活性和区分性,可以检测空气中的有毒气体,如 CO、CO₂、CH₄、NH₃ 等。

2.1 在固体中的光声效应和 OPL 的周期性变化

传统的光声光谱分析方法使用麦克风来检测光声池中的压力变化,这是一种成熟的针对固态化学物质的分析技术,其理论解释由 McDonald 等^[2]提出,主要适用于均匀的块状固体或液态材料。然而,对于其他形式的物质样品,如粉末、薄膜^[16]或化学残留物^[17],激光功率转换为振动信号强度的机制过于复杂,无法用一个方程式进行数学模拟和表达。此外,化学品、基底和空气质量等诸多因素也会产生影响,光声效应导致 OPL 变化的主要影响因素有:化学物质和基底的局部表面(垂直于表面)因热弹性膨胀引起的位移;热量从受热表面传导到周围空气层导致空气的折射率变化;产生向外传播的表面声学瑞利波;瞬态表面反射率变化;当粉末样品较厚时,粒子之间的空气间隙热膨胀。

前两个因素导致的光学相位移^[8]可以表示为

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda_{LDV}} (\Delta n_a \mu_a - n_a \Delta L) \approx \frac{4\pi \cdot \Delta T}{\lambda_{LDV}} \left[\left(\frac{dn}{dT} \right)_a \mu_a - n_a \mu_s \beta_s \right], \quad (1)$$

式中: ΔT 为激光周期性加热照射区域引起的温度变化; ΔL 为化学物质的热弹性膨胀; λ_{LDV} 为 LDV 探测的激光波长; n_a 为空气折射率; μ_a 和 μ_s 分别为空气和化学物质的热扩散长度; β_s 为化学物质的线性热膨胀系数。

假设 LDV 检测到的振动振幅与激发激光器的功率密度和化学品的吸光度效率成正比,根据以往经验,以下因素会影响检测到的振动幅度:样品形态及其边界条件、基底的机械性能和热导率(假设基底本身不吸收光能)、激光调制频率、激光调制形状和宽度、激光斑和探测激光斑的大小和重叠范围、LDV 的噪底和环境因素。上述因素会线性地影响待测振动幅度的绝对

值,但这些因素对不同激发波长下相对信号强度的定性分析值影响不大。

2.2 气体中的光声效应

气体中的光声效应指在气体介质中,通过激光等光源的周期性脉冲激励,被照射气体吸收能量后产生快速膨胀和收缩,进而产生声波,并通过声波将能量传递出去的现象。当激光束作用在气体分子上时,由于光子和气体分子的碰撞,激发出气体分子的振动和旋转。由于振动的幅度非常小,可以忽略不计,因此,这里只考虑气体分子的旋转。当激光能量足够高时,可以激发气体分子的自由旋转,使其旋转角动量改变。这种改变会使气体分子的动能增加,进而产生的瞬时加热导致气体的膨胀和收缩,引起介质折射率的改变^[18],这个过程可以描述为

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I + \beta P, \quad (2)$$

式中: I 为光强; z 为光传播的距离; α 为吸收系数; P 为压力; β 为光声系数。从式(2)可以看出:光强 I 随着光传播距离 z 的增加而逐渐减小,其减小速率由吸收系数 α 决定;同时,光强 I 还会受到光声效应的影响,即光强 I 随着压力 P 的变化而发生变化,其变化速率由光声系数 β 决定。因此,光声效应产生的光强变化取决于压力变化。

3 实验装置

3.1 激发光源

本研究使用了两种 QCL 作为激发光源。第一种激发光源采用 Block Engineering 公司生产的 MID-IR OEM 激光模块(型号 MINI-QCL),是一种空气冷却的脉冲激光器,波数调节范围为 940~1375 cm⁻¹。一个紧凑型控制电子器件(mini-QCL-200)通过无线路由器与笔记本电脑实现通信,脉冲重复频率最高可达 3 MHz,最大占空比为 5%。图 1 显示了在不同波数下

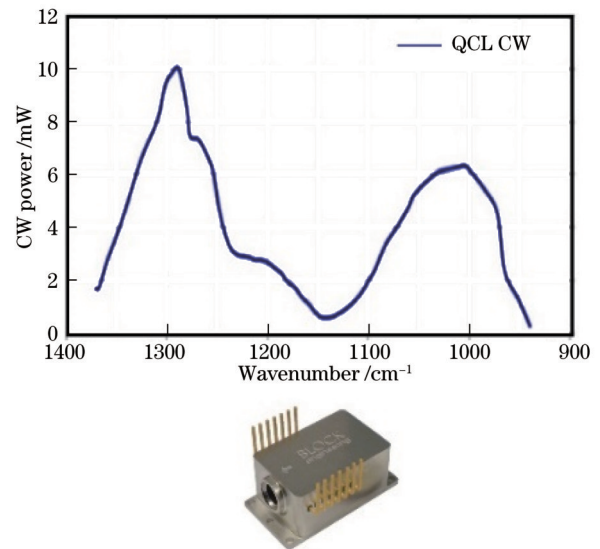


图 1 MINI-QCL 的连续波(CW)和脉冲输出功率
Fig. 1 CW and pulse output power of MINI-QCL

的输出连续波功率分布。本研究将其应用为连续波激光光源,并通过可调频率的光学斩波器对其进行调制。未使用光学斩波器进行调制时,输出的激光功率很小,因而引起的振动幅度也很小,无法在 3 MHz 激发频率下检测到光声信号。当把它作为连续波激光光源使用,并将光学斩波器的频率范围调整至小于 3 kHz,可显著增加振动幅度。输出的激光束为 $2\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的椭圆形准直光束。

第二种激发光源采用了 Daylight Solutions 公司的多路宽光谱可调谐激光系统(型号 MIRcat-1200-1824),该系统包含两个 QCL 模块,调谐范围分别为 $6.89\sim 7.55\ \mu\text{m}$ 和 $7.65\sim 8.5\ \mu\text{m}$,同时配备了便于调整的一束同轴红色对准激光。两模块的最大连续功率均大于 150 mW。由于 QCL 的工作温度仅为 $17\text{ }^\circ\text{C}$,需要水冷却才能在连续波模式下运行。图 2 展示了 MIRcat 系统在不同波数下的功率分布。在实验中,采用了连续波模式,并在激光前安装了光学斩波器(MC2000, Thorlabs 公司)以产生具有固定频率和占空比的脉冲光信号。

3.2 远距离激光多普勒测振

为了检测 QCL 激发的痕量炸药的光声振动信号,设计了一种基于 Mach-Zehnder 构型的长距离激光振动测量系统,图 3(a)和图 3(b)分别是系统的光学结构设计示意图和系统外观图。采用 Keopsys 公司的 1550 nm 窄线宽激光器(CEFL-KILO Model No. M501)作为光源,其中,线宽要求小于 3 kHz,保证在几千米检测距离下有足够的相干长度,激光器的输出功

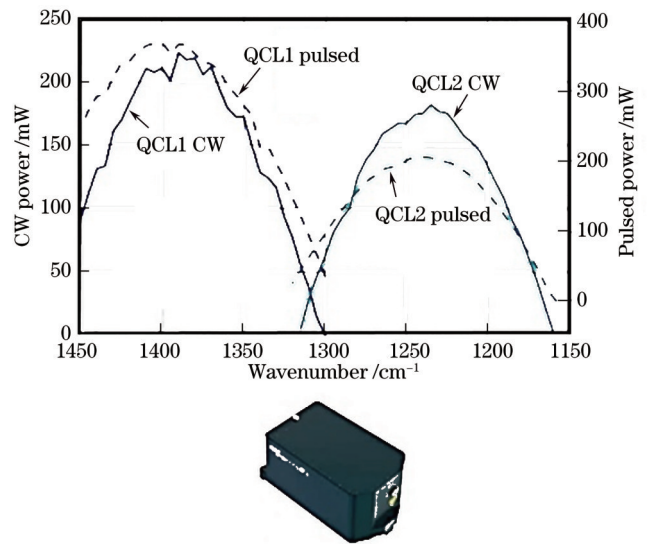


图 2 MIRcat-1200-1824 QCL 的连续波和脉冲输出功率
Fig. 2 CW and pulse output power of MIRcat-1200-1824 QCL

率设置为 100 mW。通过一个 98:2 的偏振保持(PM)光纤耦合器将激光分为物体光束和参考光束,其中在参考光路中应用 PM 光纤耦合的 40 MHz 压光光学频移器(Brimrose AMF-40-1550-2FP-ER60)引入载波频率,应用电机控制的 4 inch(1 inch=2.54 cm)扩束镜作为光学发射和接收器,通过反馈控制将激光束自动聚焦于 20~200 m 处的物体。从扩束镜发射出去的激光功率约 30 mW。虽然理论上可以采用更高的激光功率,但系统内部器件的反射会带来很多干涉噪声,从而影响测量精度。

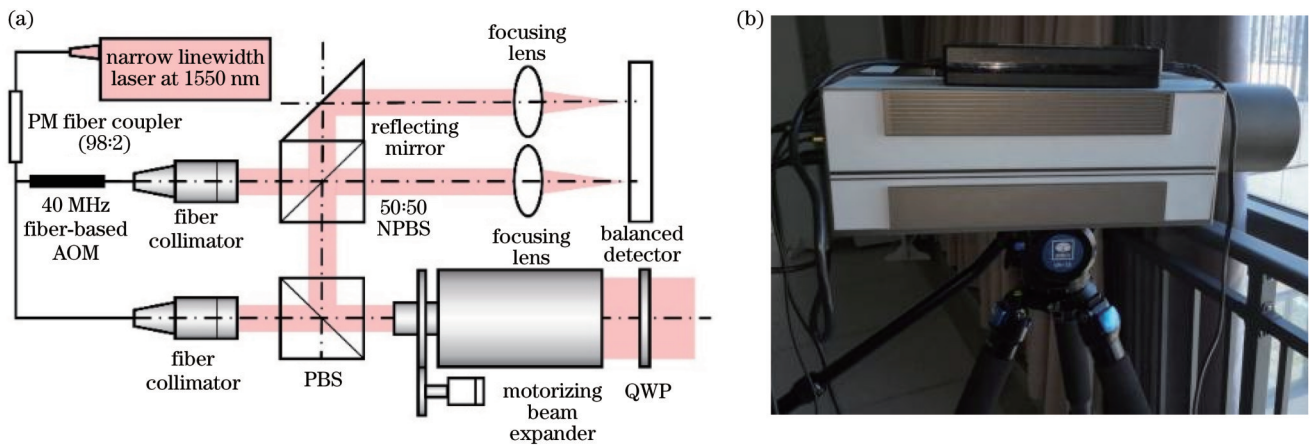


图 3 LDV 装置。(a) LDV 光学设计示意图;(b) LDV 实景图
Fig. 3 LDV device. (a) Schematic of LDV optical design; (b) LDV real scene

反射回来的测量光束与参考光束相结合,在自制的平衡探测器上生成一个干涉信号,所获得的调频(FM)信号具有 40 MHz 的中心载波频率。该 FM 信号由自主开发的基于现场可编程门阵列(FPGA)芯片的解调系统进行解调,输出信号为离面位移或速度。位移直接与干涉信号的相位变化成正比,速度与探测光

束的多普勒频移成正比。测量的噪声取决于由光电探测器检测到的干涉信号的信噪比(SNR)。当 SNR 大于 40 dB 时,速度测量的噪声小于 $0.05\ \mu\text{m/s}$ 。值得注意的是,当被测物体具有散射表面时,物体光束的入射角可在 $\pm 45^\circ$ 的范围内变化。大的入射角会降低物光的反射强度,因此会造成干涉信号的信噪比下降,但不

会对振动测量结果产生重大影响。

LDV 的优点在于检测到的振动信号的幅值和频率只与接收到的激光束的多普勒频移相关,因此,当干涉信号的信噪比在解调系统的可接受范围内(例如 >20 dB)时,所得到的振动信号不受测量距离的影响。

3.3 痕量化学品和气体化学物质探测实验装置

图 4(a)展示了在室外开放环境中痕量化学品检测的实验光路示意图,MINI-QCL 设备与测试样本之间的距离约为 1 m,光束通过可调节的反射镜照射到测试样本,激发光声效应。由于 QCL 脉冲模式的平均功率只有约 10 mW, QCL 脉冲模式的总激发功率远低于连续波模式,原因是 QCL 的占空比被限制在 5%,这将显著降低光声信号的振幅。因此,在 QCL 设备的连续波运行模式下加入一个光学斩波器进行调制,斩

波器频率设置为 1300 Hz,以避免与主要在 0~1200 Hz 范围内的环境噪声发生重叠(根据 LDV 获取的环境噪声频谱)。另一方面,LDV 发出的探测激光束同样经一个可调节的反射镜反射到测试样本上,探测光源和激发光源均不必垂直于样品表面。实验中远距离 LDV 采用 4 inch 光束扩展器,在 200 m 外把探测激光聚焦在被测化学品上,光斑大小约为 7 mm, QCL 光斑大小约为 3 mm。在 QCL 的红色定位激光和近红外感应卡的辅助下,调节两个激光斑在测试样本上重叠。图 4(b)展示了在 200 m 距离的另一端的长距离 LDV,系统对表面浓度为 $10 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ 的 PTFE 进行测试,基底为 3 mm 厚的铝板,环境声级约为 60 dB。噪声主要为建筑物的冷却塔上的空气鼓风机和 QCL 的水冷机带来的环境噪声。

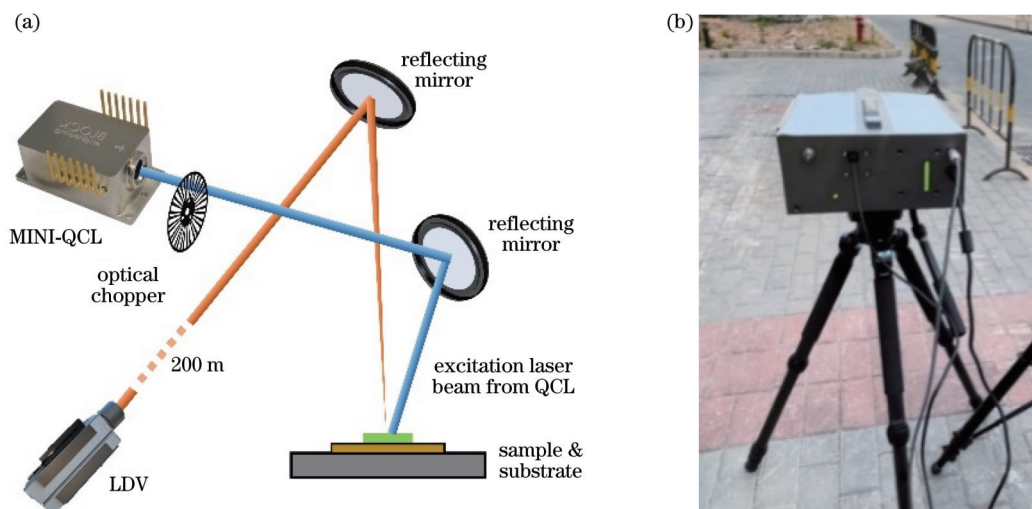


图 4 实验装置。(a) 200 m 外的实验装置;(b)另一端的 LDV 实验实景图

Fig. 4 Experimental setup. (a) Experimental setup at distance of 200 m; (b) LDV experimental setup on the other end

图 5 展示的是使用 MIRcat-1200-1824 QCL 作为激发光源对管道泄漏的少量气体进行探测的实验光路示意图。QCL 放置在距离泄漏点约 1 m 处,光学斩波器频率设置为 800 Hz。激发激光束放置在气体泄漏点上方相对靠近管道处,以保证激光束穿过目标气体;

探测光束必须与激发光束在气体泄漏点附近交汇,并聚焦于带有反射贴膜的平板上,以保证有足够的能量反射回 LDV。实验管道两端封闭,其中存放的是液态丙酮,管道上方通过直径约 2 mm 的小孔来模拟管道泄漏,除人为开孔外,需保证管道的密封性以确保不存

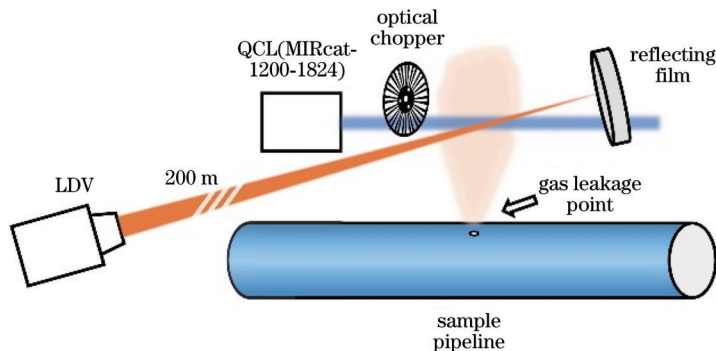


图 5 管道泄漏实验装置示意图

Fig. 5 Schematic of the pipeline leakage experiment setup

在额外的气体泄漏点。

4 分析与讨论

实验一中,采用 Block Engineering 公司生产的 MINI-QCL,斩波器频率设置为 1300 Hz。采用的 QCL 以 5 cm^{-1} 波数步长进行扫描,记录每一步的振动幅度(速度),LDV 每一步的积分时间是 0.5 s,将其归一化为 QCL 输出连续波功率,并绘制出其与波数之间的关系。图 6 展示了 PTFE 的归一化振动幅度与对应的 NICODOM 提供的标准吸收光谱的比较结果。实验中观察到了两个吸收峰,位于 1165 cm^{-1} 和

1205 cm^{-1} ,与标准 FTIR 相符合。实验二中,为了激发气态丙酮的光声振动信号,使用了高功率的 Daylight Solutions QCL,光学斩波器频率设置为 800 Hz。图 7 显示了所获得的液态丙酮的光声振动光谱与 FTIR 吸收光谱的比较结果。从 PerkinElmer Frontier FT-IR/MIR 光谱仪在衰减全反射(ATR)模式下测得的 FTIR 中可以观察到 2 个吸收峰,分别位于 1221 cm^{-1} 和 1358 cm^{-1} 。实验中观察到 2 个吸收峰,位于 1220 cm^{-1} 和 1360 m^{-1} ,与 FTIR 的峰值相符合。经测量,两个实验中光声振动光谱和 FTIR-ATR 的波长分辨率差异在 5 cm^{-1} 以内。

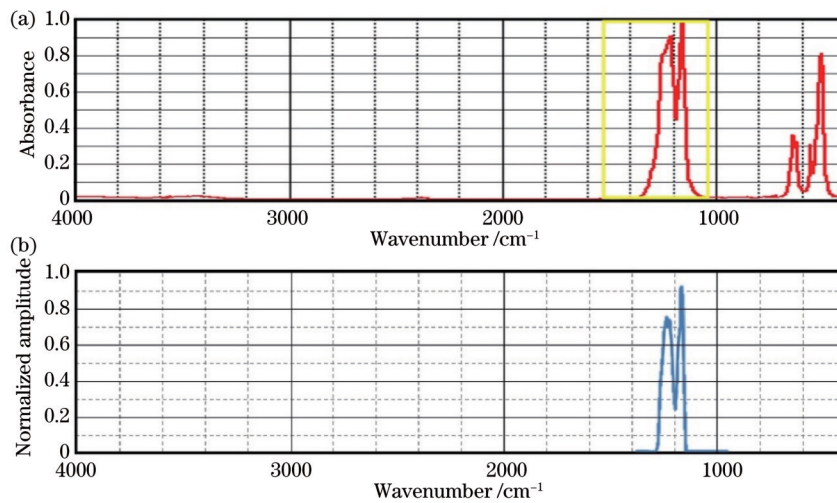


图 6 实验结果与红外吸收光谱的对比。(a) NICODOM 公司提供的 PTFE 的红外吸收光谱;(b) LDV 在不同波数下测得的归一化振动幅值

Fig. 6 Comparison of experimental result with infrared absorption spectrum. (a) Infrared absorption spectrum of PTFE provided by NICODOM company; (b) normalized vibration amplitude obtained by LDV at different wavenumbers

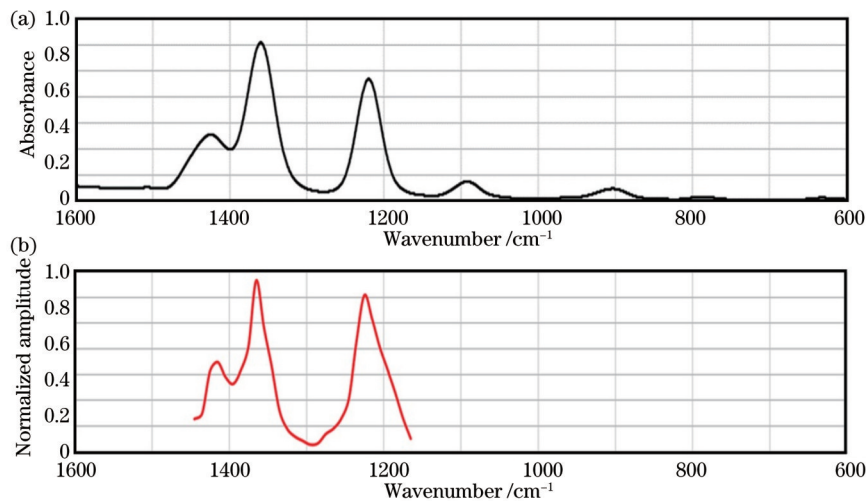


图 7 实验结果与红外吸收光谱的对比。(a) 光谱仪测定的丙酮的红外吸收光谱;(b) LDV 在不同波数下测得的丙酮的归一化振动幅值

Fig. 7 Comparison of experimental result with infrared absorption spectrum. (a) Infrared absorption spectrum of acetone measured by a spectrometer; (b) normalized vibration amplitude of acetone obtained by LDV at different wavenumbers

在上述实验结果中,测量的振动幅度能够通过激光功率进行归一化是基于以下两个假设:化学物质

的温度变化与激光功率密度的调制成正比;光程差的变化与温度变化成正比。然而,实际应用环境中的情

况可能并不绝对,许多其他因素也会影响光声振动幅值的绝对值。在对光声振动光谱结果与 FTIR 结果进行比较时,可以在相同的波数位置观察到吸收峰,但在峰之间的相对强度值中观察到偏差存在,因而需要进一步研究各种因素对峰和峰之间相对高度的影响。

实验结果表明,LDV 可以作为化学物质的光声/光热信号检测的良好传感器,并且在开放环境中保持良好的工作性能。当采用合适的 QCL 作为激发光源时,可以获得在中红外范围内各种物质的光声光谱。LDV 的测量距离会影响反射光束的接收功率,从而影响干涉信号的 SNR,导致噪声增加,检测的灵敏度降低,但通常不会影响光振动信号的测量值。LDV 检测到的振动信号的强度和频率仅取决于探测光束的频移,而不是接收功率,这是 LDV 相比于其他传感器(例如麦克风)所具有的独特优势。LDV 的探测距离受许多因素的限制,例如激光相干长度、传输功率、光学孔径、光学系统的对准等,其中相干长度是主要限制因素,其他因素可以通过工程优化解决。多纵模氦氖激光器通常具有 20 cm 的相干长度,而可见光范围的 DPSS 激光器的相干长度约为数十米,最近发展的窄线宽 1550 nm 激光器具有千米级相干长度,使设计具有几百米探测距离的 LDV 成为可能。因此,所提探测技术结合 QCL 后已被证明能够克服与光声光谱探测相关的固有限制,并使得在安全探测距离外的危险物质检测更加可靠和有效。在检测过程中,远距离 LDV 可能会受到环境噪声的干扰,例如空气湍流、环境振动等,并且还会放大 LDV 的散斑噪声。根据经验,有几种方法可以减小这些影响:1) 通过适当选择斩波器频率以避开噪声水平较高的谱段,将 QCL 激发频率调整到特定范围,以便通过适当的滤波器分离噪声;2) 增加积分时间以降低噪声水平,数学上等价于使用锁相放大器;3) 进行差分测量,使得两个探测光束拥有几乎相同的光程,得到两个相邻点的相对振动,例如将一个测量点打在被测物上,另一个测量点打在静止表面。当获得差分振动幅度时,将大大降低环境振动和空气湍流的影响。

5 结 论

采用自主研发的 LDV 作为传感器,在 200 m 距离上首次实现了痕量 PTFE 的光声信号检测。采用 QCL 作为被测化学品的激发光源,并且利用一个光学斩波器调制 QCL 光束的强度,通过 LDV 检测 QCL 引起的光声信号,通过扫描 QCL 的波长获得其光声光谱信息。该方法探测结果与标准吸收光谱高度一致,表明 LDV 作为一种远距离非接触式传感器,适用于开放

环境中的光声信号探测,在远距离危险化学品和爆炸性材料的检测中具有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Bell A G. On the production and reproduction of sound by light [J]. American Journal of Science, 1880, (118): 305-324.
- [2] McDonald F A, Wetsel G C. Generalized theory of the photoacoustic effect[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(4): 2313-2322.
- [3] Sigrist M W. Laser generation of acoustic waves in liquids and gases[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(7): R83-R122.
- [4] Castellini P, Martarelli M, Tomasini E P. Laser Doppler Vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(6): 1265-1285.
- [5] Chen X, Cheng L W, Guo D K, et al. Quantum cascade laser based standoff photoacoustic chemical detection[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20251-20257.
- [6] Choa F S, Wang C C, Khurgin J, et al. Standoff photoacoustic detections with high-sensitivity microphones and acoustic arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9824: 98240M.
- [7] Li J S, Yu B, Fischer H, et al. Contributed review: quantum cascade laser based photoacoustic detection of explosives[J]. The Review of Scientific Instruments, 2015, 86(3): 031501.
- [8] Cho P S, Jones R M, Shuman T, et al. Investigation of standoff explosives detection via photothermal/photoacoustic interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8018: 80181T.
- [9] Wynn C M, Haupt R W, Doherty J H, et al. Use of photoacoustic excitation and laser vibrometry to remotely detect trace explosives[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 9054-9059.
- [10] Marcus L S, Holthoff E L, Schill J F, et al. Photoacoustic chemical sensing: ultracompact sources and standoff detection[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9073: 907307.
- [11] Fu Y, Guo M, Phua P B. Multipoint laser Doppler vibrometry with single detector: principles, implementations, and signal analyses[J]. Applied Optics, 2011, 50(10): 1280-1288.
- [12] Hu Q, Lim J S K, Liu H A, et al. Photo-vibrational spectroscopy of solid and liquid chemicals using laser Doppler vibrometer[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19148-19156.
- [13] Skvortsov L A, Maksimov E M. Application of laser photothermal spectroscopy for standoff detection of trace explosive residues on surfaces[J]. Quantum Electronics, 2010, 40(7): 565-578.
- [14] Fu Y, Liu H A, Hu Q, et al. Photo-vibrational sensing of trace chemicals and explosives by long-distance differential laser Doppler vibrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10183: 101830B.
- [15] Wynn C M, Palmacci S T, Clark M L, et al. High-sensitivity detection of trace gases using dynamic photoacoustic spectroscopy[J]. Optical Engineering, 2013, 53(2): 021103.
- [16] Fu Y, Guo M, Phua P B. Spatially encoded multibeam laser Doppler vibrometry using a single photodetector[J]. Optics Letters, 2010, 35(9): 1356-1358.
- [17] Fu Y, Hu Q, Liu H. Standoff photoacoustic sensing of trace chemicals by laser Doppler vibrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9824: 98240O.
- [18] 殷庆瑞. 光声光热技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991. Yin Q R. Optical acoustooptic thermal technology and its application[M]. Beijing: Science Press, 1991.

Trace Hazardous Substance Detection Based on Long-Distance Laser Vibrometer

Liu Xiaoli, Wang Ziwei, Fu Yu*

Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Optical Measurement and Detection, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China

Abstract

Objective The ability to rapidly detect and identify hazardous materials, such as explosives and hazardous gases, is a critical technology that can facilitate security screening in the global effort against terrorism. Recent R&D works focus on technologies to perform standoff sensing of hazardous materials in the open environment without any sample preparation. In this work, a long-distance laser Doppler vibrometer developed by China is applied as a sensor to detect the photoacoustic signal on solid and gaseous chemicals.

Methods Photoacoustic/photothermal (PA/PT) techniques can provide sensitive non-contact solutions to overcome this challenge at a meaningful standoff distance. Since the last century, PA spectroscopy (PAS) has been applied in many applications for solid, liquid, and gas evaluation. Conventional PAS requires prior preparation of analyte samples, and the measurement is conducted within a controlled environment, such as a well-isolated photoacoustic cell. The response signal is captured by a highly sensitive microphone or any other form of sensor located close to or in direct contact with the sample. Hence, commercial PAS equipment limits the technique in a laboratory environment. In recent years, research focuses on improving the excitation source and the detection technology in the open air. Two trends have been observed in the research area of standoff detection of chemicals and explosives: (1) Quantum cascade laser (QCL) becomes a more practical excitation source due to its high power, broadly tunable wavelength in the mid-infrared ray (IR) range, and compact size over other light sources such as optical parametric oscillators (OPOs); (2) non-contact optical detection techniques, such as thermal imaging and laser interferometry become generally accepted methods for standoff detection of PA/PT signals in the open air. Recently, a conventional and mature interferometric system, namely a laser Doppler vibrometer (LDV), has been applied to detect the photo-vibrational signal on solid and liquid due to the PA effect. The standoff distance of the LDV will influence the received power of the reflected beam only, but it will not affect the phase change detected due to the PA/PT effect.

We apply a long-distance laser Doppler vibrometer developed by China (Fig. 3) to detect the photo-vibrational signal 200 m away. A QCL with a chopper is adopted as the excitation source. By scanning the wavelength of the QCL, we measure the amplitude of the vibration signals and obtain photoacoustic spectra. The results are compared with that of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and found to be highly consistent.

Results and Discussions In order to detect the vibration caused by the photoacoustic effect, a long-distance laser Doppler vibrometer is fabricated. Fig. 3(a) shows the optical design. Generally, it is a typical Mach-Zender interferometer. The light source used is a narrow linewidth laser at 1550 nm from Keopsys company. A fiber-coupled acoustic-optic modulator with frequency of 40 MHz is applied in the reference beam to introduce a carrier frequency. A motorized 4-inch beam expander is designed to focus the laser beam to a distance of 20–200 m. The reflected object beam interferes with the reference beam, and the output signal from a balanced detector is a frequency-modulated (FM) signal with a central carrier frequency of 40 MHz. A field programmable gate array (FPGA)-based demodulation system developed by China is used to demodulate the FM signal and retrieve the optical path length change due to the photoacoustic effect. The output is displacement or velocity that can be selected by the user. Generally, displacement is directly proportional to the phase change, and velocity is proportional to the frequency shift of the object beam. When the signal-to-noise ratio (SNR) of the interferometric signal output from the detector is more than 45 dB, the noise floor of the displacement measurement is < 5 pm. This means an amplitude vibration of 5 nm at a certain frequency will have a peak of 30 dB in the spectrum. For long-distance LDV, the SNR of the optical signal is fluctuating from 20 dB to 50 dB.

Fig. 6(b) shows the photoacoustic spectrum of trace polytetrafluoroethylene (PTFE) powder obtained by the long-distance LDV. Compared with a standard FTIR of PTFE [Fig. 6(a)], it is found that they coincide very well. Fig. 7(b) is the photoacoustic spectrum of leaking acetone, and it coincides with FTIR [Fig. 7(a)] obtained by the PerkinElmer Frontier FT-IR/MIR spectrometer. It is worth noting the amplitude of the photo-vibrational signal obtained by LDV may fluctuate due to environmental factors. Longer integration time may stabilize the reading and eliminate the noise floor, but it may reduce detection efficiency in real applications.

Conclusions We adopt a QCL as the excitation light source due to its high power, broadly tunable wavelength in the mid-IR range, and compact size over other light sources. The intensity of the QCL beam is modulated by an optical chopper, while the LDV is used to detect the vibration signals due to the photoacoustic effect. The photo-vibrational spectra obtained by plotting the normalized vibration amplitude against the QCL output wavenumber range are compared with standard FTIR spectra. The experiments demonstrate that the long-distance laser Doppler vibrometer developed by China can effectively detect photo-induced vibration signals from hazardous solid and gaseous chemicals at up to 200 m in an imperfect environment. It is a necessary first step in a series of developments to realize the proposed technology for standoff detection of hazardous materials in defense and security screening applications.

Key words interferometry; photoacoustic effect; laser Doppler vibrometer; vibration analysis