

激光诱导热光栅光谱测温技术研究

瞿谱波 关小伟 张振荣 王晟 李国华 叶景峰 胡志云

Laser induced thermal grating spectroscopy thermometry technique

Qu Pu-Bo Guan Xiao-Wei Zhang Zhen-Rong Wang Sheng Li Guo-Hua Ye Jing-Feng Hu Zhi-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 123301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.123301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.123301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气雾化辅助激光诱导击穿光谱检测水中的痕量金属元素

Detection of metal element in water using laser-induced breakdown spectroscopy assisted by nebulizer

物理学报.2015, 64(2): 024212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024212>

连续波差分吸收激光雷达测量大气 CO₂

Continuous-wave modulation differential absorption lidar system for CO₂ measurement

物理学报.2014, 63(10): 104214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104214>

基于多元定标法的脐橙 Pb 元素激光诱导击穿光谱定量分析

Quantitative analysis of laser induced breakdown spectroscopy of Pb in navel orange based on multivariate calibration

物理学报.2014, 63(10): 104213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104213>

基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度测量温度影响修正方法研究

Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报.2013, 62(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234204>

激光诱导 AIO 自由基 B²Σ⁺→X²Σ⁺ 跃迁光谱研究

Study on the emission spectrum of AIO radical B²Σ⁺→X²Σ⁺ transition using laser-induced breakdown spectroscopy

物理学报.2013, 62(22): 224211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224211>

激光诱导热光栅光谱测温技术研究*

瞿谱波[†] 关小伟 张振荣 王晟 李国华 叶景峰 胡志云

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

(2014年12月3日收到; 2015年1月29日收到修改稿)

报道了激光诱导热光栅光谱测温技术的研究. 通过两束相干交叉的脉冲抽运光, 在 NO_2/N_2 混合气中诱导出热光栅, 一束满足布拉格散射条件的连续探测光在交叉区域激励出相干的热光栅信号, 经过空间和光谱滤波的信号光由光电倍增管探测, 并由数字示波器显示和存储. 该信号携带了丰富的流场信息, 通过频域分析, 对气体的温度进行了测量, 热光栅光谱技术测量的温度与热电偶温度符合得很好. 同时还利用热光栅光谱技术进行了气体声速的直接测量, 在一定的温度范围内, 测量结果与理论曲线基本一致, 显示了该技术具有较高的测量精度与多参数同时测量的能力. 对影响信号波形的因素进行了分析, 结果表明, 热光栅光谱测温技术在高压强环境下应用具有独特的优势, 是一种应用前景广阔的激光燃烧诊断技术.

关键词: 热光栅, 共振吸收, 温度测量, 声速

PACS: 33.50.Hv, 42.62.Fi, 42.65.-k, 51.20.+d

DOI: 10.7498/aps.64.123301

1 引言

随着环保与减少化石燃料消耗日益受到重视, 要求燃烧过程更加高效、更加清洁. 因此, 获得关键的热物理参数对于燃烧学研究及燃烧器设计至关重要. 传统的接触式测量技术会对燃烧过程产生干扰. 激光诊断技术, 如相干反斯托克斯拉曼散射 (coherent anti-Stokes Raman scattering, CARS) [1], 是一种广泛应用的高精度测温技术. 通过气体分子 (通常为 N_2) 的振动或转动共振增强, 经四波混频过程产生一束类激光的 CARS 信号光 [2]. 振动 CARS 通常能测量 1000 K 以上的温度, 在火焰中的单点测温精度为 5%—10% [3]. 发动机点火前, 即使已达最大压缩, 其典型温度也在 400—600 K 范围内, 此时 N_2 分子转动态的粒子数分布对温度更加敏感, 通过转动 CARS 技术, 在内燃机中单点测温精度可以达到 5%—8% [4]. 激光诱导荧光 [5] (laser induced fluorescence, LIF) 通常用于温度场的二维测量, LIF 技术的空间分辨率通常小于 100 μm . Kaiser 等 [6] 采用甲苯作为示踪粒子,

在光学发动机中通过像素平均的方法, 获得了 1% 的测温精度. CARS 与 LIF 技术分别通过测量信号强度的光谱分布和光强来得到温度, 在测量中容易受到抽运光强扰动与探测器噪声的影响 [7]. 尤其是高压强下, 分子间的非弹性碰撞降低了有效荧光量子产率, 使得 LIF 信号强度大幅降低, 不利于信号的解读 [8].

本文报道了一种新颖的光学诊断技术——激光诱导热光栅光谱 (laser induced thermal grating spectroscopy, LITGS) 技术. Cummings [9] 于 1994 年应用 LITGS 技术测量了 NO_2 中气体声速、热扩散率和声阻尼系数, 在实验室环境下, 通过输出波长为 587—595 nm 的染料激光器, 抽运相对浓度为 500 ppb 的 NO_2 分子, 由于气体组分不确定性的限制, 单点测温精度为 0.5%, 同时还对 LITGS 的理论进行了研究. 1998 年, Latzel 等 [10] 在甲烷/空气火焰中利用 LITGS 技术, 通过染料激光 (波长 307 nm) 抽运 OH 的 R1(5) 线, 得到了信噪比良好的 LITGS 信号. LITGS 技术测得的火焰温度为 $2101 \text{ K} \pm 85 \text{ K}$, 与 N_2 CARS 测得的 $2015 \text{ K} \pm 60 \text{ K}$

* 激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (批准号: SKLLIM1307) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: qupubo@nint.ac.cn

符合得很好, 拟合压强为 $43 \text{ bar} \pm 2.6 \text{ bar}$, 与压力传感器 40 bar 测量值也基本一致 ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$). 2006年, Stevens和Ewart^[11]通过片状的抽运光在均匀的 NO_2/N_2 混合气中实现了LITGS一维测温、测压. 热光栅信号通过条纹相机采集, 在 297 K 的温度下, 测温精度为 0.3% , 沿着激光线上的空间分辨率为 $150 \mu\text{m}$. 这是首次将传统的LITGS点测量技术扩展为一维测量技术, 对于湍流燃烧与发动机流场诊断具有重要的实用价值, 但是还需要考虑到沿激光线上介质不均匀性引起的浓度、温度和压力的瞬态变化所导致的信号解释困难等因素. 2013年, Williams等^[7]首次利用LITGS技术在汽油直喷光学发动机内进行了高精度的温度测量, 在不同燃料混合物燃烧的情况下, 得出缸内平均温度在点火状态下为 $617 \text{ K} \pm 12.2 \text{ K}$, 做功状态下为 $507 \text{ K} \pm 10.6 \text{ K}$, 测温精度达到了 0.4% ; 定量研究了汽油/醇混合燃料中醇对缸内温度的蒸发冷却和充气冷却效应, 测量结果显示E50乙醇汽油燃料的温度 (593 K) 比纯汽油的温度 (620 K) 低 27 K , M56 甲醇汽油燃料的温度 (584 K) 比纯汽油的温度 (618 K) 低 34 K , 说明醇具有明显的降温效应.

目前, 国内尚未见到LITGS技术的相关报道. 我们开展了LITGS技术的理论和实验研究工作, 对于燃烧流场温度测量, 尤其是多参数同时测量具有重要的意义, 未来有望应用于湍流燃烧与发动机流场的现场参数测试.

2 热光栅理论

激光诱导热光栅现象源于激光电场与介质的非线性相互作用, 是一种光学四波混频过程. 当两束偏振方向一致的相交脉冲激光在时间和空间上都相干时, 交叉区域会形成干涉电场. 通过共振吸收, 处于基态的分子跃迁到激发态, 形成粒子数光栅. 由于碰撞淬灭效应, 激发态分子在回到基态的过程中, 所吸收的能量以热的形式释放到周围介质中, 改变了介质的折射率, 形成随时间指数衰减的温度光栅. 交叉区域的电场在介质中同时激发出相向传播的声波, 进而形成声驻波, 声驻波随时间周期性振荡, 即所谓的声光栅. 两种光栅共同作用形成热光栅. 一束连续的探测激光以一定的角度入射到该光栅上, 如果这四束光的波矢满足相位匹配条件, 就会产生一束相干的信号光.

光栅波长 Λ 为

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\text{pump}}}{2 \sin \theta}, \quad (1)$$

其中, λ_{pump} 为抽运光波长, θ 为两束抽运光相交的半角.

探测光满足布拉格条件,

$$\lambda_{\text{probe}} = 2\Lambda \sin \beta, \quad (2)$$

其中, λ_{probe} 为探测光波长, β 为探测光入射角.

根据参考文献[9], 介质的密度和折射率扰动由一个线性流体力学方程来描述, 方程的解包含两项:

$$\Delta\rho(t) = A \exp(-D_T q^2 t) + B \cos(C_s q t + \Phi) \times \exp(-\Gamma q^2 t), \quad (3)$$

其中, D_T 为气体的热扩散率; Γ 为声阻尼系数; q 为光栅波矢, $q = 2\pi/\Lambda$; C_s 为声速, $C_s = \sqrt{\gamma RT/M}$; γ 为热容比; R 为理想气体常数; M 为分子摩尔质量; T 为温度; A, B, Φ 为气体和激光参数的函数.

解的第一项描述由于热扩散而耗散的静态热光栅, 第二项描述由于黏滞阻尼而耗散的声光栅. 通过测量混合信号的振荡周期 τ 就能得到声速, $\tau = \Lambda/C_s$. 在气体组分已知的条件下, 就能得到相关的温度信息:

$$T = (f\Lambda)^2 \frac{M}{\gamma R}, \quad (4)$$

其中 f 为信号的振荡频率.

温度的局部扰动会改变介质的密度, 温度和密度的扰动由 (5a) 和 (5b) 式描述:

$$\Delta T = \phi \frac{\alpha}{\rho C_p} 2I\tau_p, \quad (5a)$$

$$\Delta\rho = -\rho \frac{\Delta T}{T}, \quad (5b)$$

其中, $\alpha, \rho, C_p, I, \tau_p$ 和 ϕ 分别为吸收系数、密度、定压热容、激光光强、激光脉宽和用来描述吸收激光能量百分比的无量纲常数.

$\Delta\rho/\rho$ 和 $\Delta T/T$ 约为 10^{-4} — 10^{-5} , 因此LITGS测温技术对流场温度的影响非常小, 是一种无干扰的非接触式测量技术.

3 实验系统

根据LITGS测温技术探测介质的不同, 需要合理地选择抽运光源. 倍频输出的Nd:YAG脉冲激光器是实验室常见的光源, 可以用于激励热光栅. NO_2 分子在抽运波长为 532 nm 处有比较强的吸收, 而且 NO_2 是大气污染和发动机尾气中的常见成分, 因此 NO_2 作为探测介质是非常合适的.

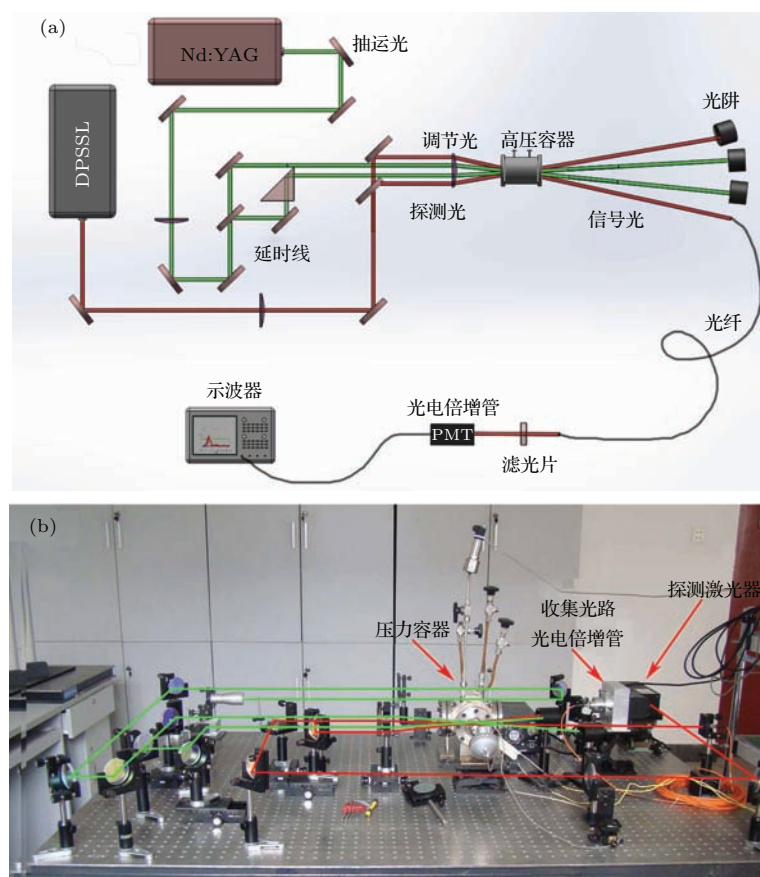


图1 (网刊彩色) 激光诱导热光栅温度测量系统 (a) 光路示意图; (b) 装置实物图

Fig. 1. (color online) Laser induced thermal grating temperature measuring system: (a) optics setup; (b) facility picture.

图1(a)为LITGS单点测温技术的光路示意图, 图1(b)为对应的装置实物图, YAG激光器(Continuum PL. 8000)输出的532 nm光(1 cm^{-1} , 8 ns, 40 mJ, 对应图1(b)中绿线部分)由分束镜分成两束能量一致的光, 其中一路光通过延时光路, 使得两束光在时间和空间上都是相干的. 两束平行的抽运光通过一个焦距为800 mm的交叉透镜, 在透镜焦点处交叉, 此时在交叉区形成热光栅. 二极管抽运固体激光器(CNI MRL-F-671-1W)输出的一束连续的探测光(TEM₀₀, 1.5 W, 对应图1(b)中红线部分)以布拉格角入射到热光栅, 产生一束相干的信号光, 由多模光纤收集. 此时多模光纤还起到空间滤波器的作用, 可以过滤掉一部分杂散的671 nm光. 信号光通过干涉滤光片(Semrock LL01-671-25), 滤掉杂散的532 nm光. 经过空间滤波和光谱滤波的信号光由光电倍增管(赛凡光电 71 D101-CR131)探测, 通过示波器(Tektronix TDS 644 B)显示和数据采集. 探测光在入射到热光栅之前, 要分出一部分光作为调节光, 用于收集光路的定位和调节. 实验中, 调节光会被遮挡, 以

保护光电倍增管.

压力容器内充有NO₂/N₂混合气, 其中N₂作为稀释气. 容器内的压强可以通过阀门调节, 内部温度通过电加热带控制. 两端用石英玻璃密封, 作为光学窗口, 在探测区域上方约1 cm处安装有K型热电偶, 见图2.

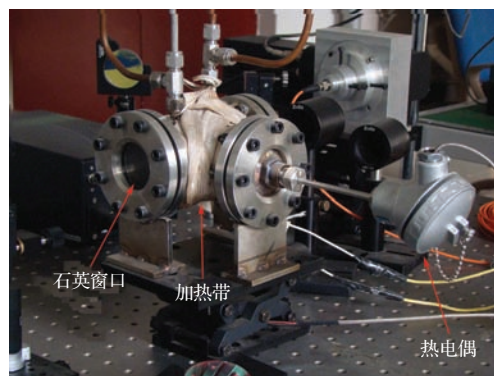


图2 (网刊彩色) 压力容器装置实物图

Fig. 2. (color online) Picture of the gas cell.

实验中, 为了减小抽运光能量、探测光功率抖动以及探测器电噪声的影响, 实验数据都采取100

个点平均的方式记录, 示波器记录的典型热光栅信号波形如图3所示. 由于光电倍增管工作于负电压状态, 因此信号幅度显示为负电平.

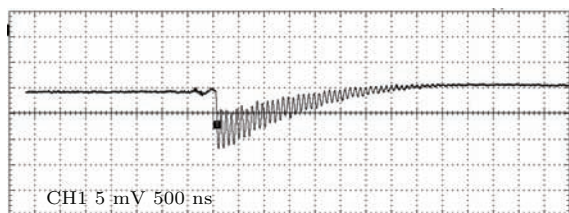


图3 示波器记录的典型热光栅信号波形

Fig. 3. Typical thermal grating signal waveform recorded by an oscilloscope.

4 结果与讨论

4.1 光栅波长标定

根据(4)式, 测量温度前需要了解气体的详细组分信息 M/γ 、光栅波长 Λ 以及信号振荡频率 f . 在实验室条件下, 气体的详细组分是可控的, 信号振荡频率可以通过对实验数据做傅里叶变换精确求得, 因此温度测量精度主要由光栅波长决定.

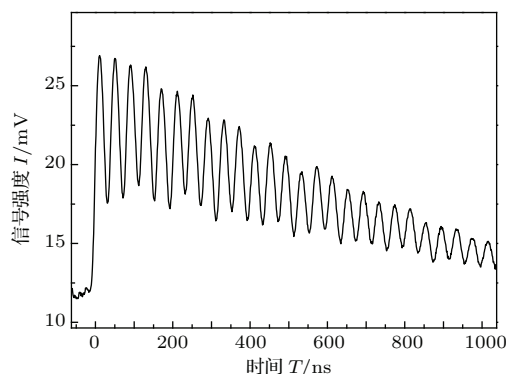


图4 恒定温度为 303 K 时的标定信号波形

Fig. 4. Calibrated signal waveform at a constant temperature of 303 K.

由简单的几何关系可以知道 $\tan \theta = L/(2f_c)$, 其中 L 为两束平行抽运光的间距, f_c 为所用交叉透镜的焦距, 因此确定光栅波长需要首先精确测量 L 和 f_c . 由于透镜焦距与波长有关, 因此需要对抽运光波长下的透镜焦距进行重新标定, 另外直接测量具有一定光斑尺寸的两束平行光间距的误差很大, 这就导致最终的温度不确定度很大. 本文采用在 303 K 的恒定温度下对光栅波长进行标定, 通过温度值反推得到光栅波长. NO_2/N_2 标定气中 NO_2 的浓度为 0.8%, 总压强为 5 atm ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$), 计算得到 $\gamma = 1.3979$,

$M = 28.157 \text{ g/mol}$, 采集的标定信号如图4所示. 通过温度标定, 确定 $\Lambda = 14.23 \mu\text{m} \pm 0.04 \mu\text{m}$.

4.2 LITGS 温度测量与气体声速测量

为了说明 LITGS 技术的测温精度, 在压力容器内进行了 300—500 K 范围内的单点温度测量. 以 5 K 为单位逐步提高容器内的温度, 待容器内温度稳定后, 采集 LITGS 信号, 同时记录热电偶示数. 测量结果如图5所示, 其中纵坐标为 LITGS 测量温度, 横坐标为热电偶测量温度. 由实验数据点的分布可知, LITGS 测量温度比热电偶测量温度略微偏高, 最大偏差为 12 K. 这是因为热电偶探头在高温下存在热辐射, 如果计入这一部分热辐射损耗, 则两者的差别会减小; 另外一个可能的原因是通过温度标定确定光栅波长时, 由分压比计算得到的气体组分 (M, γ) 存在误差, 结果使得 LITGS 测量温度也存在误差. 根据测量结果, 采用 LITGS 技术的测温精度约为 0.28%, 比 CARS 技术的测温精度 ($\sim 5\%$) 提高了一个数量级, 显示了 LITGS 在流场高精度温度测量方面的独特优势.

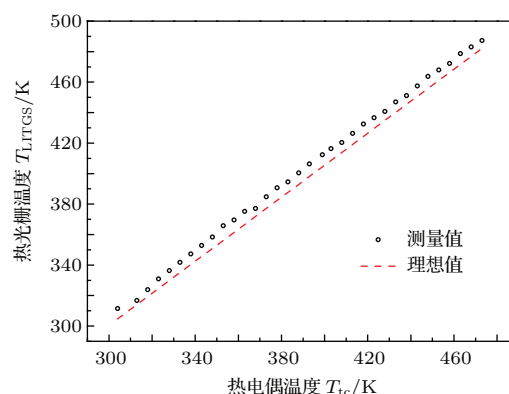


图5 (网刊彩色) 热光栅测量温度与热电偶读数的对比

Fig. 5. (color online) Comparison between the LITGS temperature and the simultaneously recorded thermocouple temperature.

气体声速对于研究高密度下气体行为, 验证分子动力学计算和分子相互作用的理论势函数非常重要^[12], 传统的诊断技术只能测量声频 (20—20000 kHz) 或几百 kHz 频率范围内的声速, 对于空气中的声速测量, 其温度往往低于 300 K^[13]. LITGS 技术不仅是一种高精度的测温技术, 还能直接测量气体声速, 测量频率可以达到几十 MHz, 温度可以达到近 2000 K.

采用同样的实验系统, 对压力容器内的 N_2/NO_2 混合气气体声速进行了测量, 受实验条

件所限, 只测量了 300—500 K 温度范围内的气体声速, 结果如图 6 所示.

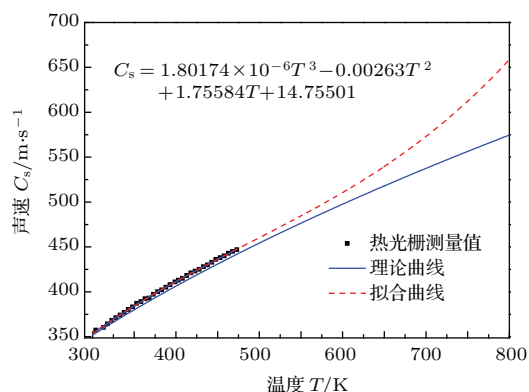


图 6 (网刊彩色) LITGS 技术测量气体声速

Fig. 6. (color online) Sound speed measurement with laser induced thermal grating spectroscopy technique.

对测量值拟合得到: $C_s = 1.80174 \times 10^{-6} T^3 - 0.00263 T^2 + 1.75584 T + 14.75501$. 在 300—500 K 的范围内, 拟合曲线和理论曲线 ($C_s \propto \sqrt{T}$) 符合得很好, 随着温度的升高, 二者的偏差逐步增大. 这是因为我们只测量了 300—500 K 温度范围内的气体声速, 通过数据拟合得到的声速曲线无法反映出气体在更高温度时的行为, 如果测量的温度范围能进一步扩大, 就会使拟合结果与理论曲线更加一致. 根据拟合关系式, 就能比较准确地计算一定温度范围内的任意气体声速值.

4.3 影响因素分析

当压强由 1.46 atm 升高到 5.19 atm, 信号强度随之增加, 如图 7(a) 所示 (根据文献 [14] 报道, 信号强度与压强的关系为 $I \propto p^2$). LITGS 信号源于分子的碰撞淬灭作用, 当压强升高时, 气体密度增加, 单位体积内的分子数增多, 有利于增强分子的碰撞淬灭, 因此信号强度随压强升高而增强. 信号强度增强的同时, 信号峰的数量也增加, 同时信号的衰减速率减小. 这是因为压强升高时, 气体的热扩散速率减小, 形成的热光栅结构能持续更长的时间, 散射信号强度不至于很快衰减, 使得可观察的信号峰数量增多, 同时曲线更平坦衰减更慢. 信号强度和峰数量的增加对于提高信号频率测量的精度是有利的.

当压强升高时, 气体声速与压强的关系如图 7(b) 所示, 可以看到在测量的压强范围内 (1—6 atm), 声速基本与压强无关, 因此在不同压强下测量得到的气体温度也应该一致. 如果压强低于一个大气压, 则二者不满足图 7(b) 所示的

规律. 此时, 气体分子的行为不再满足连续流体条件, 更类似离散粒子的集合, 气体声速接近分子热运动的平均速度, 比连续流体情况下的声速大. 尽管如此, 低压情况下测量的声速依然能够达到 3% 的精度 [15].

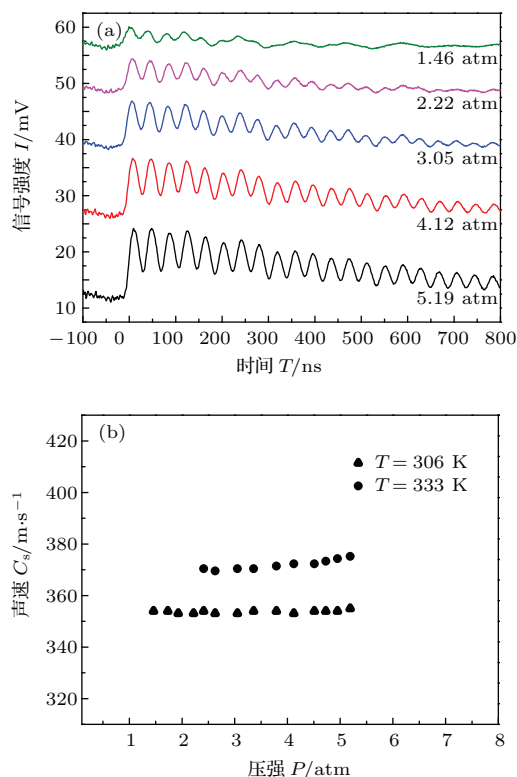


图 7 (网刊彩色) 压强对热光栅信号的影响 (a) 不同压强下的热光栅波形; (b) 不同温度下气体声速与压强的关系

Fig. 7. (color online) Influence of pressure on the thermal grating signal: (a) thermal grating waveforms at different pressures; (b) the relationship between the sound speed and the pressure of gas at different temperatures.

当气体组分浓度变化时, 对热光栅信号波形的影响如图 8 所示. 图 8(a) 中 NO_2 浓度为 0.2%, 可以看到一个很明显的电致伸缩光栅信号峰 (第一个峰), 其振荡周期为之后的热光栅周期的一半, 信号振荡曲线衰减比较快, 寿命约为 0.5 μs ; 图 8(b) 中 NO_2 浓度为 1%, 未观察到电致伸缩光栅信号峰, 信号曲线比较平缓, 寿命约为 1 μs . NO_2 分子的电致伸缩系数相对较大, 在外加电场作用下容易极化, 会产生较强的电致伸缩光栅信号. 图 8(a) 中 NO_2 的浓度较低, 而此时所用的抽运光能量较大, 电致伸缩光栅信号能与热光栅信号竞争, 因此会出现电致伸缩峰. 而图 8(b) 中 NO_2 浓度较高, 以共振吸收为主, 电致伸缩光栅信号受到抑制, 因此只能看到热光栅信号.

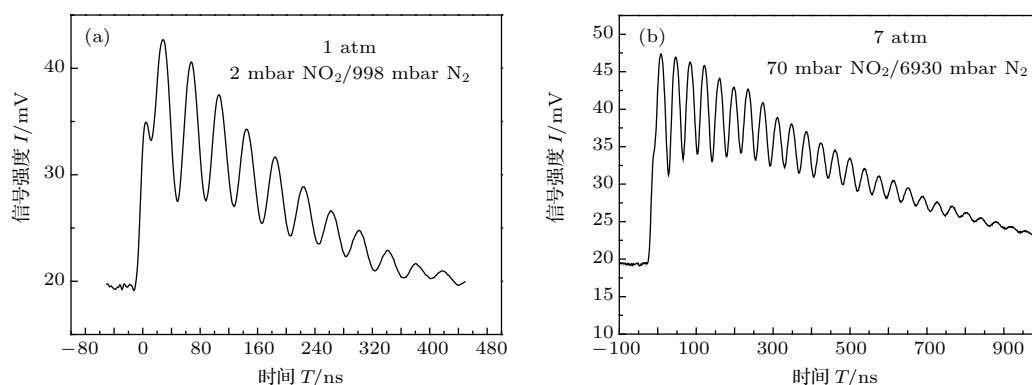


图8 组分浓度对热光栅信号波形的影响 (a) 1 atm, 0.2% 浓度下的热光栅信号; (b) 7 atm, 1% 浓度下的热光栅信号

Fig. 8. Influences of species concentrations on the thermal grating signal waveforms: (a) 1 atm, the thermal grating signal with a concentration of 0.2%; (b) 7 atm, the thermal grating signal with a concentration of 1%.

电致伸缩光栅信号较弱, 在气体介质中通常比较难以产生, 但其无需共振吸收分子, 能在任意气体介质中激发产生, 适用性更广, 后续将会开展电致伸缩光栅测温技术的研究工作。

由图7和图8可以看到, 随着压强的升高, 信号的衰减速率降低, 信号寿命增加, 信号寿命 τ_D 与热扩散率 D_T 满足关系式: $D_T = \lambda^2 / 8\pi^2 \tau_D$. 因此, 通过测量热光栅信号的衰减寿命就能得出气体的热扩散率, 以及其他的气体动力学参数. 以上讨论充分表明LITGS技术是一种应用前景比较广阔的, 适用于高压强环境的多参数激光诊断技术。

5 结 论

本文介绍了LITGS技术用于温度测量的原理以及实验系统. 在 NO_2/N_2 混合气中获得了具有较高信噪比的热光栅信号, 热光栅测量温度与热电偶记录的温度符合得很好, 显示了该技术具有很高的测温精度. 同时, 还利用该技术进行了气体声速的直接测量, 测量结果在一定的范围内与理论曲线相符合. 对影响热光栅信号的因素进行了分析, 表明在高压环境下有利于提高温度测量的精度, 相对于其他激光燃烧诊断技术, 热光栅技术在高压环境下应用具有很大的优势. 分析了不同浓度吸收分子对热光栅信号的影响, 在低浓度、高抽运能量条件下产生的电致伸缩信号同样能应用于温度测量. 最后, 还对通过测量热光栅信号的衰减寿命, 得出热

扩散率等其他气体动力学参数的可能性进行了探讨. 后续的工作会将热光栅技术应用于火焰以及发动机燃烧室温度测量。

参考文献

- [1] Eckbreth A C, Dobbs G M, Stufflebeam J H 1984 *Appl. Opt.* **23** 1328
- [2] Kiefer J, Ewart P 2011 *Prog. Energy Combust. Sci.* **37** 525
- [3] Ewart P 1985 *Opt. Commun.* **55** 124
- [4] Brackmann C, Bood J, Afzelius M, Bengtsson P E 2004 *Meas. Sci. Technol.* **15** R13
- [5] Hanson R K, Seitzman J M, Paul P H 1990 *Appl. Phys. B* **50** 441
- [6] Kaiser S A, Child M, Schulz C 2013 *Proc. Comb. Inst.* **34** 2911
- [7] Williams B, Edwards M, Stone R, Williams J, Ewart P 2014 *Comb. Flame* **161** 270
- [8] Brown M S, Roberts W L 1998 *AIAA* 98-0235
- [9] Cummings E B 1994 *Opt. Lett.* **19** 1361
- [10] Latzel H, Dreizler A, Dreier T, Heinze J, Dillmann M, Stricker W, Lloyd G M, Ewart P 1998 *Appl. Phys. B* **67** 667
- [11] Stevens R, Ewart P 2006 *Opt. Lett.* **31** 1055
- [12] Latzel H, Dreier T 2000 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2** 3819
- [13] Hart R C, Balla R J, Herring G C 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 1946
- [14] Danehy P M, Paul P H, Farrow R L 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1564
- [15] Cummings E B, Hornung H G, Brown M S, DeBarber P A 1995 *Opt. Lett.* **20** 1577

Laser induced thermal grating spectroscopy thermometry technique*

Qu Pu-Bo[†] Guan Xiao-Wei Zhang Zhen-Rong Wang Sheng Li Guo-Hua
Ye Jing-Feng Hu Zhi-Yun

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

(Received 3 December 2014; revised manuscript received 29 January 2015)

Abstract

In this paper the laser induced thermal grating spectroscopy thermometry technique is investigated. Two coherent, pulsed pump lasers are crossed in NO_2/N_2 mixture to induce an interference pattern, owing to the resonant absorption and the subsequently quenching effect. The heat released into the bulk gas can modulate the local refractive index (temperature grating). Simultaneously, the sound wave induced by the electric field forms the standing wave (acoustic grating). These two effects mentioned above produce a thermal grating, and a continuous probe laser satisfying the Bragg scattering condition, generates a coherent signal in the crossed region. The spatial and spectral filtering signal is detected with a photomultiplier tube, and displayed with a digital oscilloscope. The signal carries plenty of flow field information. The gas temperature is obtained through frequency analysis. In order to increase the precision of temperature measurement, we calibrate the grating spacing at a known temperature in a pressurized gas cell. Then the temperature in a range of 300–500 K is measured by the laser induced thermal grating spectroscopy technique, and the thermocouple temperatures are recorded at the same detecting point simultaneously. Both of them agree well with each other, though some discrepancies are still existent. The difference is explained according to the heat radiation loss. We also use this technique to measure the gas sound speed directly, which is crucial to studying the gas behaviors at high pressures and the interaction between molecules. In a certain temperature range, the measurement result and the theoretical curve are nearly consistent, which shows the high precision and multi-parameter measurement ability of laser induced thermal grating spectroscopy. The factors influencing the signal waveform are analyzed, too, and the results demonstrate that the signal duration, the signal intensity, and the oscillation peaks increase with pressure increasing. As a consequent, the accuracy of measurement can be improved. Also, other gas dynamic parameters, such as the thermal diffusion rate and the heat conductivity, can also be measured by using this technique. The unique advantage of laser induced thermal grating spectroscopy thermometry technique provides us with a powerful diagnostic tool used in high pressure condition.

Keywords: thermal grating, resonant absorption, temperature measurement, sound speed

PACS: 33.50.Hv, 42.62.Fi, 42.65.-k, 51.20.+d

DOI: 10.7498/aps.64.123301

* Project supported by the Foundation of State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter of China (Grant No. SKLLIM1307).

[†] Corresponding author. E-mail: qupubo@nint.ac.cn