

基于单脉冲 BOXCARS 法火焰温度测量装置的研制

张 虎,戴景民,金 钊
(哈尔滨工业大学,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:研制了基于单脉冲 CARS 方法的温度测量装置,使用宽带染料激光器产生线宽 200cm^{-1} 的斯托克斯光,一次脉冲就可以得到完整的 CARS 光谱,实现了温度的瞬时测量。

关键词:CARS; 温度测量; 单脉冲

中图分类号:TN249

文献标识码:A

Flame Temperature Measurement Appliance Based on Single-pulse Boxcars Technology

ZHANG Hu, DAI Jing-min, JIN Zhao
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Coherent Anti-stokes Raman Scattering (CARS) technology measured temperature through pulses cumulation of pump laser in the past decades. The measurement period was up to ten seconds or even longer. This method will cause relative large error once used in unstable temperature field diagnosis. Based on single-pulse CARS technology, the temperature measurement appliance which introduced broadband laser source ($>200\text{cm}^{-1}$) was developed. The appliance can get the whole CARS signal spectrum during a pulse width and measure the temperature instantaneously.

Key words: CARS; temperature measurement; single-pulse

1 引 言

随着激光技术的不断发展,激光光谱诊断技术以其独特的优势在科学研究的众多领域正得到越来越广泛的应用。其中相干反斯托克斯拉曼散射技术(CARS)以其高强度、易采集、能够应用于恶劣环境的特点成为光谱诊断的有力工具。其中,对透明燃烧火焰温度和组分浓度的测量是 CARS 方法的一个重要应用领域。传统的 CARS 方法采用多激光脉冲扫描方式得到目标成分的 CARS 光谱^[1],在燃烧火焰比较稳定的时候可以得到十分准确的结果,但当目标火焰是非稳态时,由于不同温度下 CARS 信号的强度和线型都有较大差异,脉冲累加就会带来非常大的误差,难以得到准确结果^[2]。在实际的燃烧诊断应用中,火焰大都是非稳态的,因此实现单脉冲 CARS 测量对燃烧诊断研究有相当重要的意义。

2 测量原理^[1]

CARS 是一种介质中四波混频的非线性光学效应。自从 1963 年发现四波混频效应并命名为相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)以来,CARS 技术得到了广泛的研究,并发展了以介质的非线性极化理论和光的电磁波理论为基础的相关理论^[3]。由非线性光学效应方程可以推导出 CARS 光强表达式:

$$I_4 = \frac{\mu^2 \omega_4^2}{n_1 n_2 n_3 n_4} |\chi_{\text{CARS}}^{(3)}|^2 I_1 I_2 I_3 L^2 \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k L}{2}\right)^2} \quad (1)$$

其中, n_1, n_2, n_3 和 n_4 分别是介质相当于光波频率为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 ω_4 时的折射率; I_1, I_2 和 I_3 为三束入射

作者简介:张 虎(1981 -),男,博士研究生,主要从事燃烧诊断及 CARS 技术研究工作。E-mail: zhanghu@hit.edu.cn

收稿日期:2007-09-16

光波的光强;波矢差 Δk 称为波矢失配,反映了信号光和三束入射光之间的相位关系。

从式(1)可以看出,只有当波矢失配的绝对值达到最小值,即 $\Delta k = 0$ 时,CARS 光强才能达到最大^[2],这时称为相位匹配。满足相位匹配的 CARS 信号强度表示为^[3]:

$$I_4 = \frac{\mu^2 \omega_4^2}{n_1 n_2 n_3 n_4} |\chi_{\text{CARS}}^{(3)}|^2 I_1 I_2 I_3 L^2 \quad (2)$$

由上式可知,此时 CARS 信号的强度与入射光的强度、入射光相互作用区域的长度和三阶非线性极化率的大小有关。

CARS 光强表达式指出了决定 CARS 信号强度的各种因素之间的关系,但如果要使用该式计算 CARS 信号的强度,则必须首先得到介质的三阶非线性极化率,包含两部分,即共振项和非共振项:

$$\chi_{\text{CARS}}^{(3)} = \chi_{\text{R}}^{(3)} + \chi_{\text{NR}}^{(3)} \quad (3)$$

有了 CARS 信号的理论基础,就可以计算出目标组分的理论 CARS 光谱分布。而由于 CARS 光谱的线型与温度存在对应关系,因此可以通过实验测量的 CARS 信号光谱与理论光谱比对的方法,得到目标温度。

从测量方法上,CARS 可以分为窄带和宽带两种。窄带 CARS 是指泵浦光源和斯托克斯光源都采用窄带激光器,采用扫描的方式来获得目标组分的 CARS 信号,如图 1 所示。窄带 CARS 的局限性是显然的,为了得到完整的 CARS 光谱,扫描需要较长的时间,因此无法进行时间分辨率测量,对非稳态燃烧场也无法测量。而且要保证 CARS 的光谱分辨率,对激光器的线宽和频率稳定性要求都很高。宽带 CARS 降低了窄带 CARS 对激光单色性的要求,而且实现了 CARS 的时间分辨测量,并使对非稳态场的测量成为可能,如图 2 所示。按照相位匹配方式的不同,目前主要分为 BOXCARS^[4] 和 USED CARS^[5] 两种方法,而最初被采用的共线匹配方式已经被淘汰。

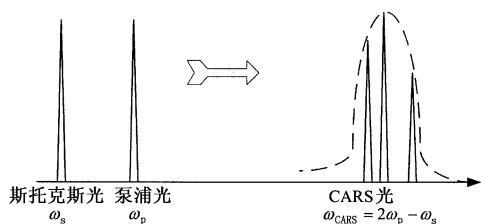


图1 窄带 CARS 测量

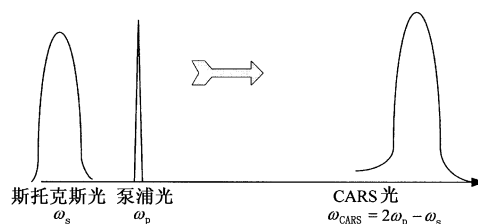


图2 宽带 CARS 测量

3 测量装置

为了实现高的空间分辨率,同时实现时间分辨的 CARS 测量,我们设计了单脉冲空间交叉相位匹配(DOXCARS)方案。系统结构如图 3 所示。

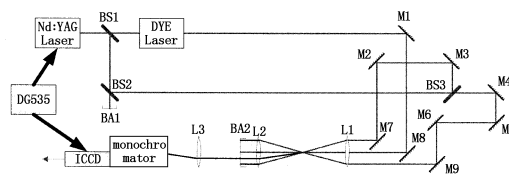


图3 CARS 测量系统结构图

以氮气为测量目标气体,我们选用了美国 CONTINUUM 公司的 Nd:YAG 激光器 Powerlite Precision II 9010 作为泵浦光源,选定泵浦光波长为 532nm,脉冲宽度 7ns,线宽 1cm^{-1} ,选用德国 Radiant Dye 公司的 RDP-2M 宽带染料激光器,线宽可达 1nm。染料激光器出射光在 330 ~ 850nm 范围内可调,方便对不同目标组分进行测量,本实验中定为 607nm。为了尽可能减小背景噪声的影响,提高测量信噪比,采用 TI 公司的 DG535 同步控制泵浦激光器和信号采集系统,在可靠采集 CARS 信号的前提下,尽量缩短 ICCD 采集时间,有效减小背景噪声的影响。

在本系统中,泵浦激光器出射的泵浦光,经分光片 BS1 后分为两束,一束用于泵浦染料激光器,得到斯托克斯光,另一束经分光片 BS2 和 BS3 进行能量衰减后,分为两束,作为泵浦光和斯托克斯光经 M1 ~ M9 组成的光学系统一起入射到测量区域。

光学系统的设计满足两方面的要求:一、满足相位匹配条件;二、保证泵浦光和斯托克斯光的光程差尽可能小。满足相位匹配条件是产生相干散射的前提,其中包含了两方面的含义,即能量守恒和动量守恒。这就对入射到测量区域的光束的方向和波长的相对关系有了严格要求。预先知道目标组分的拉曼频移就可以确定合适的泵浦光与斯托克斯光波长,而光束方向则通过调整 M7 ~ M9 的位置,改变三束入射光在透镜的入射位置,从而达到调整光束方向

的目的。由于泵浦光脉冲有一定宽度,约 7ns,因此如果泵浦光和斯托克斯光的光程差过大,大于 2.1m,则在时间上不能交迭,无法产生 CARS 信号。而在实际测量中,光程差大于几十毫米,CARS 信号就会大大减弱,难以检测。因此,应当保证各束入射光的光程尽可能相等,才能得到比较强的 CARS 信号。通过改变 M4 与 BS3 之间的距离,保证两束泵浦光光程基本相等,然后调整 BS3 与 BS2 的相对位置调整与斯托克斯光之间的光程差。这样,就可以保证入射光的光程基本相等,保证 CARS 信号在时间上的交迭。

根据相位匹配关系,产生的 CARS 信号有确定的方向,因此,可以通过空间滤波的方式,使用遮光板 BA2 滤除 CARS 信号以外的其他光线。CARS 信号经透镜 L3 入射到单色仪,完成信号采集。得到的 CARS 信号与理论光谱线型进行拟合即可得到待测温度。

4 相位匹配关系的计算

典型的相位匹配方式如图 4 所示,由于泵浦光和测量光是简并的,所以这两束光波矢大小相等,即 $\vec{k}_1 = \vec{k}_2$, $\vec{k}_3$ 为斯托克斯光波矢, $\vec{k}_{as}$ 为产生的 CARS 信号光波矢。如图 4 所示,设 $\vec{k}_1$ 与合成矢量的夹角为 α , $\vec{k}_3$ 与合成矢量的夹角为 θ ,而光矢量 $\vec{k}$ 的大小可以用波数 ν 来表示,则有:

$$\nu_1 \cos \theta + \nu_2 \cos \theta = \nu_3 \cos \alpha + \nu_{as} \cos \beta \quad (1)$$

$$\nu_3 \sin \alpha = \nu_{as} \sin \beta \quad (2)$$

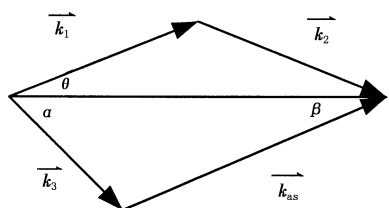


图4 BOXCARS 技术的相位匹配

取 $\theta = 2^\circ$, 并代入实验初值:

$$\nu_1 = \nu_2 = 18797 \text{ cm}^{-1}$$

$$\nu_3 = 16474.5 \text{ cm}^{-1} \quad (3)$$

$$\nu_{as} = \nu_1 + \nu_2 - \nu_3 = 21119.5 \text{ cm}^{-1}$$

得到:

$$\alpha \approx 2.2646^\circ$$

$$\beta \approx 1.7663^\circ$$

分别按照得到的角度 α 及 θ 控制斯托克斯光和泵浦光入射到透镜上的位置,即可达到相位匹配。 β 角则示出了产生的 CARS 信号光的方位,方便空间滤波,得到纯净的 CARS 信号。

5 结束语

CARS 测温技术从产生以来,已经有了很大的发展。最初是通过脉冲扫描叠加的方式获得 CARS 光谱,虽然具有信噪比高的优点,但每次测量需要几十秒以上的时间,无法实现瞬态测量,不可能用于非稳态燃烧场的研究^[6]。因此,应用领域大大受到限制。单脉冲 CARS 测量技术的诞生解决了这一问题。利用宽带的斯托克斯光,可以通过一次激光脉冲就得到完整的 CARS 光谱,单次测量时间仅几个纳秒。

本装置采用单脉冲技术的同时,选择了空间交叉的相位匹配方式,尽管存在光路不易调整,信号强度相对较低等缺点,但能够达到很高的空间分辨率,结合单脉冲测量实现的时间分辨,将能够对非稳态燃烧场进行具有时间和空间意义的研究。本装置的成功研制将对火箭燃烧诊断技术的发展产生推动作用。在以后的研究中,还可对本装置进行扩展,方便地实现双泵浦方法同时测量温度和多气体组分浓度。

参考文献:

- [1] A C Eckbreth. Laser diagnostics for combustion temperature and species[J]. Abacus, Kent, UK, 1988:162-300.
- [2] 杨仕润. CARS 在超音速燃烧中的应用[D]. 北京:中国科学院,1998.
- [3] R W Minck, R M Terhune, W G Rado. Laser-stimulated Raman effect and resonant four-photon interactions in gases H_2 , D_2 and CH_4 [J]. Applied Physics, 1963, 3(10): 181-184.
- [4] A C Eckbreth. BOXCARS: Crossed-beam phaser-matched CARS generation in gases [J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(7): 421-423.
- [5] 赵建荣, 杨仕润, 俞刚. 环形泵浦相位匹配 CARS 技术的匹配方式和空间分辨率的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 1998(7): 12-17.
- [6] 李春喜, 赵鸣, 张蕊娥, 等. 双基推进剂燃烧火焰温度 CARS 测定技术[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 65-67.