

# 光参量振荡器在 CARS 测温技术中的应用

申铨国 张铁强 殷景志

(吉林工业大学应用物理系 长春 130025)

**提要** 通过理论分析和实验结果,叙述了在宽带单脉冲相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)光谱测温技术中,利用光参量振荡器(OPO)代替常用的染料激光器作为斯托克斯光源的可行性问题。理论分析指出,测温范围在 2200 K 以内,用 OPO 作斯托克斯光源是可行的,并利用该实验装置实测酒精灯火焰中的温度分布,其结果与辐射温度计测量结果比较,误差在 5% 以内。

**关键词** CARS 测温技术,光参量振荡器,染料激光器

近几年 CARS 光谱测试技术发展迅速,已成为流体温度及浓度场分布测量中最有效的方法。因它具有非接触、高精度、高时间和空间分辨率等优点,广泛地用于高温炉内温度场分布、各种火焰内部温度、各种内燃机内温度和浓度分布,以及等离子体和化学反应过程中的瞬间温度和浓度测定等方面<sup>[1-3]</sup>。在 CARS 测试装置中,以往用染料激光器作斯托克斯光源,但染料激光器需要经常更换染料,它的化学反应和温度变化会使输出不稳定,调谐困难,系统庞大等缺点。为解决这些问题,曾有人<sup>[4]</sup>提出利用光参量振荡器(OPO)代替染料激光器作斯托克斯光源。本文对此作了理论上的分析,并在 2200 K 测温范围内,利用我们设计的 OPO-CARS 实验装置,实测了酒精灯火焰中不同位置的温度,与辐射温度计测量结果相比较得出相对误差不超过 5%,这与采用染料激光器的结果相差不多。

## 1 CARS 测温原理及 OPO-CARS 测温范围分析

CARS 是四波混频的非线性光学现象。频率为  $\omega_p$  的泵浦光(可分为两束)和频率为  $\omega_s$  的斯托克斯光会聚于试样上时通过三阶非线性极化率  $\chi^{(3)}$ ,实现光场与物质的相互作用而产生频率为  $\omega_r$  的相干反斯托克斯信号光,由光的耦合波方程可求出信号光强度<sup>[5]</sup>

$$I_a(\omega_r) = \langle \mathbf{f} \rangle + 2 \left[ \frac{M}{\bar{\chi}_{NR}} \right] \langle \sum_{j=0} \bar{\chi}_j \rangle + \left[ \frac{M}{\bar{\chi}_{NR}} \right]^2 \left[ \langle \sum_{j=0} \bar{\chi}_j \rangle^2 + \langle \sum_{j=0} \bar{\chi}_j \rangle^2 \right] = e(\omega_r) + 2cf(\omega_r \cdot T) + c^2g(\omega_r \cdot T) \quad (1)$$

式中  $\langle \rangle$  表示卷积运算,而且

$$\langle \mathbf{f} \rangle = \left[ \overline{I_p^2 I_s} \right]^2 \int d\Delta I_p(\omega_r - \Delta) F(\Delta) \int d\omega_p I_p(\omega_p) I_s(\omega_p - \Delta) \quad (2)$$

$$e = \langle \mathbf{f} \rangle \quad c = M/\bar{\chi}_{NR} \quad f = \langle \sum_{j=0} \bar{\chi}_j \rangle \quad g = \left[ \langle \sum_{j=0} \bar{\chi}_j \rangle^2 + \langle \sum_{j=0} \bar{\chi}_j \rangle^2 \right] \quad (3)$$

$M$  为试料的摩尔浓度,  $\bar{\chi}_{NR}$  为一个分子的平均非共振极化率,  $\bar{\chi}'$  和  $\bar{\chi}''$  为一个分子的共振非线性极化率的实数和虚数部分,  $T$  为被测试料温度。

由(1)式可见, CARS 信号光谱是与样品温度  $T$  和摩尔浓度  $M$  两个参数有关的。在一定浓度下, 把温度  $T$  作为光谱曲线拟合参数时, 可通过 CARS 信号光谱计算出被测温度。为此, 首先在一定浓度不同温度时, 计算  $f$  和  $g$  值。然后改变浓度, 继续计算  $f$  和  $g$  值, 从而得到信号光谱的理论数据库。为计算实验所获得的信号光谱对应的被测温度, 把温度作为拟合参数, 实验光谱和已有的理论数据库进行曲线拟合, 得出被测温度。本论文利用了 CARSFIT (Sandianational Laboratory, USA) 理论数据库。

在单脉冲宽带 CARS 测温技术中, 把 OPO 作为斯托克斯光源, 因其输出光带宽相对比较窄(一般为  $50 \sim 80 \text{ cm}^{-1}$ ), 高温区测温范围会受到限制。OPO-CARS 测温范围分析如下。

CARS 光强度同分子的振动转动能级上粒子数密度有关。根据玻尔兹曼分布规律, 振动量子数为  $\nu$  的激发态上的粒子数密度  $N(\nu)$  和最低振动能级上粒子数密度  $N(0)$  的比值<sup>[6]</sup>

$$\frac{N(\nu)}{N(0)} \propto \exp\{-[E(\nu) - E(0)]/kT\} = \exp\{-hc[G(\nu) - G(0)]/kT\} \quad (4)$$

振动项  $G(\nu)$  为

$$G(\nu) = \omega(\nu + 1) - \omega\chi_e \left[ \nu + \frac{1}{2} \right]^2 \quad (5)$$

$\omega$  为分子基振动圆频率,  $\chi_e$  为分子非谐振常数, 一般情况  $\omega \gg \chi_e$ , 把玻尔兹曼常数  $k$ , 普朗克常数  $h$  以及(5)代入(4)得

$$\frac{N(\nu)}{N(0)} \propto \exp(-1.44\omega\nu/T) \quad (6)$$

当  $\nu \geq 3$  的激发态上粒子数密度小于最低态的粒子数密度的  $1/100$  时, 可以不考虑这些高激发态上的跃迁贡献, 只考虑量子态  $\nu = 1 \rightarrow 0$  间跃迁的冷带和  $\nu = 2 \rightarrow 1$  态间跃迁的第一“热带”。那么由(6)式可求出这种情况下的可测最高温度, 即  $\frac{N(3)}{N(0)} \leq 0.01$  时的  $T = 2200 \text{ K}$ 。

同样方法考虑转动态之间的跃迁(只考虑  $Q$  支跃迁)。量子数为  $J$  的转动能级上的粒子数密度  $N(J)$  相对最低转动能级上粒子数密度  $N(0)$  之比为

$$\frac{N(J)}{N(0)} \propto (2J + 1) \exp[-\beta hcJ(J + 1)/kT] \quad (7)$$

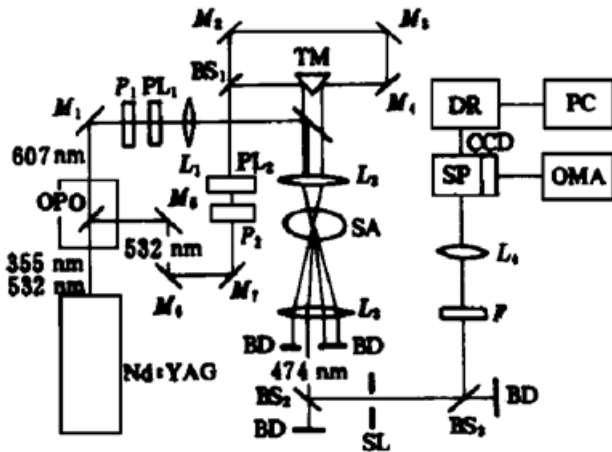
$$\beta = \beta_e - \alpha \left[ \nu + \frac{1}{2} \right] + \gamma_e \left[ \nu + \frac{1}{2} \right]^2 \quad (8)$$

$\beta_e$ ,  $\alpha$  和  $\gamma_e$  为分子的转动常数。经计算  $\nu = 2$ ,  $T = 2200 \text{ K}$  时,  $J = 60$  的转动能级上粒子数密度相对最低态转动能级上粒子数密度为  $0.0101$ 。因此, 测温范围为  $2200 \text{ K}$  以内时, 可只考虑  $J = 60$  以下的转动能级间的跃迁。另一方面, 计算得知对  $\text{N}_2$  气体来说  $Q(J = 60)$  跃迁频移和  $Q(J = 0)$  跃迁频移之间间隔为  $59 \text{ cm}^{-1}$ 。而 OPO 输出光的线宽一般为  $60 \text{ cm}^{-1}$ , 与以上计算值接近。这就说明,  $2200 \text{ K}$  以下温度范围内利用 OPO 替代染料激光器作斯托克斯光源是可行的。

## 2 实 验

图 1 是实验装置示意图。Nd<sup>3+</sup>·YAG 激光器(Sunlite 10)输出波长为  $532 \text{ nm}$ , 线宽为  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ , 脉冲能量为  $96 \text{ mJ}$  的倍频光和波长为  $355 \text{ nm}$ , 能量为  $140 \text{ mJ}$  的三倍频光。其中倍

图 1 实验装置



OPO: 光参量振荡器;  $M_1 \sim M_7$ : 反射镜;  $L_1 \sim L_4$ : 透镜;  $P_1, P_2$ : 半波片;  $F$ : 滤光片;  $PL_1, PL_2$ : 偏振器;  $BS_1 \sim BS_3$ : 分束器;  $BD$ : 光陷阱;  $TM$ : 三角镜;  $SA$ : 样品;  $SP$ : 单色仪;  $CCD$ :  $CCD$  相机;

$DR$ : 驱动源;  $PC$ : 微计算机

Fig. 1 Experimental setup

OPO: optical parametric oscillator;  $M_1 \sim M_7$ : mirrors;  $L_1 \sim L_4$ : lenses;  $P_1, P_2$ : 1/2 waveplates;  $F$ : filter;  $PL_1, PL_2$ : polarizers;  $BS_1 \sim BS_3$ : beam splitters;  $BD$ : beam dump;  $TM$ : triquetrous mirror;  $SA$ : sample;  $SP$ : spectrometer;  $CCD$ :  $CCD$  camera;  $DR$ : motor driver;  $OMA$ : optical multichannel analyzer;  $PC$ : personal computer

频光由光延时反射镜  $M_5, M_6$  和  $M_7$  反射后通过分束器  $BS_1$  分为间距为 4 mm 左右的两束光作为试料(通常为空气中的  $N_2$  气体)的泵浦光; 另一三倍频光用作 OPO 的泵浦光, 入射于 OPO 内的 BBO 晶体。通过调谐 BBO 晶体的相位匹配角, 其输出中心波长调谐于 CARS 测温所需要的 606.7 nm, OPO 输出能量为 26 mJ, 线宽为  $72 \text{ cm}^{-1}$ 。满足相位匹配条件的 532 nm 的两束泵浦光和 606.7 nm 的斯托克斯光经焦距为 20 cm 的透镜  $L_2$  聚焦于被测酒精灯火焰中的不同位置, 每点形成直径为 0.2 mm, 长为 1 mm 的类似圆柱形微小测量区。泵浦光和斯托克斯光与火焰里的  $N_2$  分子相互作用生成相干反斯托克斯信号光, 沿着满足相位匹配条件的方向发射出来。该信号光经与  $L_2$  相同的透镜  $L_3$  收集之后, 通过分束器  $BS_2, BS_3$  和滤光片  $F$  进一步滤掉泵浦光和斯托克斯光, 只有中心波长为 474 nm 的信号光进入双单色仪  $SP$  而被分光。该信号光谱被  $CCD$  转换为电信号之后, 通过光学多通道分析器  $OMA$  和微计算机  $PC$  处理后显示信号光谱或与理论光谱数据库拟合后给出被测点的温度值。

### 3 实验结果

利用 OPO-CARS 实验装置对酒精灯火焰里的四个不同位置(如图 2 所示)进行了温度测量, 并通过光谱拟合法求出了各点的温度。图 3 为拟合光谱线所得到的温度和理论光谱与实验光谱的比较。为便于比较, 同时用辐射温度计测量酒精灯火焰里的该四个点的温度, 比较结果列于表 1。

表 1 OPO-CARS 与辐射计测温结果的比较

Table 1 Comparison of the two measured temperatures using OPO-CARS and a pyrometer

position in flame	CARS temperature/K	pyrometer temperature/K	comparing result
			absolute difference/K / relative difference/%
1	748.75	781.30	- 32.5/4.1
2	620.28	647.70	- 27.4/4.4
3	897.33	920.50	- 33.2/3.6
4	549.02	622.20	- 28.2/4.5

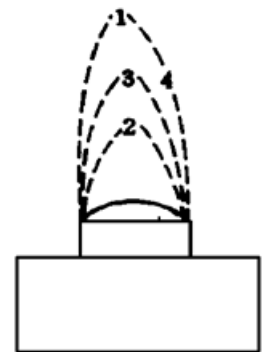


图 2 酒精火焰里的四个测温点

Fig. 2 The four detected regions of the alcohol flame

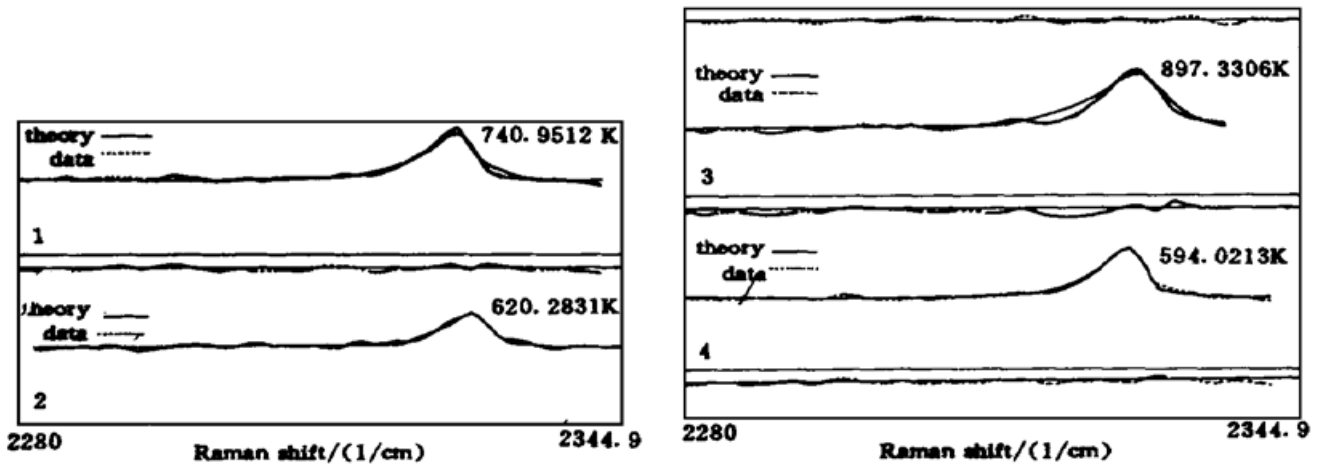


图 3 酒精火焰里四个位置处测量拟合结果

Fig. 3 The temperature fitting result for alcohol flame

由表 1 看出,其相对误差均不超过 5%,CARS 测温值均略低于辐射温度计的测温值,这个结果与常用的染料激光器作为斯托克斯光源的实验结果基本一致。

通过上述理论分析和实验结果说明,宽带 CARS 测温实验装置中,在不甚高的测温范围内利用 OPO 替代以往常用的染料激光器是可行的。这种新装置可以解决因使用染料激光器而带来的不利于现场实用化的许多问题,为 CARS 测温装置实用化提供了有效的途径。

### 参 考 文 献

- 1 D. A. Greenhalgh, F. M. Porter. The application of coherent anti-Stokes Raman scattering to turbulent combustion thermometry. *Combustion and Flame*, 1983, **49**: 171~ 181
- 2 R. P. Lucht, R. E. Teets, R. M. Green *et al.*. Unburned gas temperatures in an internal combustion engine.  $\bar{\tau}$  CARS temperature measurements. *Combust. Sci. and Tech.*, 1987, **55**: 41~ 61
- 3 W. Meier, I. Plath, W. Stricker. The application of single-pulse CARS for temperature measurements in a turbulent stagnation flame. *Appl. Phys.*, 1991, **B53**(5/6): 339~ 346
- 4 D. Brüggemann, J. Hertzberg, B. Wies *et al.*. Test of an optical parametric oscillator (OPO) as a compact and fast tunable Stokes source in coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS). *Appl. Phys.*, 1992, **B55**(4): 378~ 380
- 5 R. J. Hall, L. R. Boedeker. CARS thermometry in fuel-rich combustion zones. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(9): 1340~ 1346
- 6 T. Parameswaran, D. R. Snelling. A computer program to generate theoretical coherent anti-Stokes Raman spectra. Canada, DREO Technical Note, 1982. 8. 1~ 18

## A New CARS Thermometry Using an Optical Parametric Oscillator

Shen Xuanguo Zhang Teiqiang Yin Jingzhi  
(Jilin University of Technology, Changchun 130025)

**Abstract** A new more practical CARS thermometry is set up using an optical parametric oscillator (OPO). The dye laser as a broadband Stokes source is replaced by the tunable OPO. Theoretical analysis and experiment demonstrate that the new setup is useful in the case of measuring temperature below 2200 K, and it possesses advantages compared to the conventional dye laser, such as tunable frequency, the stable output and spectral properties, the construction of a compact CARS system and so on.

**Key words** coherent anti-Stokes Raman spectrum (CARS), optical parametric oscillator (OPO), thermometry, dye laser