

文章编号: 0253-2239(2001)02-206-05

拉曼激发激光诱导电子荧光流场测量系统中 标记过程的研究

施翔春 王 杰 肖绪辉 王晓勇 王 鹏 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

摘要: 研制了一套拉曼激发激光诱导电子荧光空气流场测速系统, 利用 Nd:YAG 激光器的二次谐波及其抽运的氧气受激拉曼散射作为标记光源, 以 ArF 准分子激光作为荧光再现光源, 并用像增强 CCD 摄像机 (ICCD) 记录荧光图像, 成功地获得了纯氧及空气中的标记线的荧光图像, 并进行了氧气喷流速度测量的初步研究。

关键词: 拉曼激发激光诱导电子荧光; 荧光图像; 标记

中图分类号: TB96: O433 文献标识码: A

1 引 言

拉曼激发激光诱导电子荧光 (RELIEF) 空气流场测量方法是近几年发展起来的一种光学流场检测方法, 它具有无需注入粒子、不干扰流场、测量精度高、测速范围宽、结果处理简单直观等特点。此方法于 80 年代中期由美国普林斯顿大学 Miles 教授首先提出^[1,2], 我们也开展了这方面的研究工作, 并对原方法进行了改进, 提出了基于序列脉冲技术的拉曼激发激光诱导电子荧光方法, 可用于非稳定流场速度的测量, 并简化了时序控制系统^[3]。本文报道了我们初步的实验结果。

2 原 理

拉曼激发激光诱导电子荧光方法属于一种标记示踪法, 利用空气中大量存在的氧分子作为示踪粒子, 通过拉曼激发过程, 将氧分子激发到一个长寿命的振动激发态上, 相当于对氧分子进行了“标记”, 被“标记”的氧分子随流场运动, 经过一定的时间间隔后, 再将被“标记”的氧分子选择性地激发到更高的电子能级上, 处于电子态上的氧分子将迅速跃迁回到低能态, 同时发出荧光, 用高灵敏度 CCD 的摄像机拍摄荧光图像, 并采集到计算机内进行图像处理, 即可获得流场速度分布和大小。

如图 1 所示, 波长为 532 nm 和 580 nm 的激光脉冲同光路、同时刻注入风洞中, 实现氧分子

$X^3\Sigma_g^-(\nu=0)$ 到 $X^3\Sigma_g^-(\nu=1)$ 的禁戒跃迁, 该激发态的寿命很长, 在纯氧中为 27 ms, 经过一段延时后 (根据所测流场速度的不同, 延时通常在几个到几十个 μs 的范围内), 利用波长为 193 nm 的 ArF 准分子激光将 $X^3\Sigma_g^-(\nu=1)$ 态的氧分子激发到舒曼-龙格 (Schumann-Runge) 能带中 $B^3\Sigma_u^-(\nu=7)$ 的能级上, 随后氧分子通过自发辐射跃迁回到低能级, 并发出荧光。

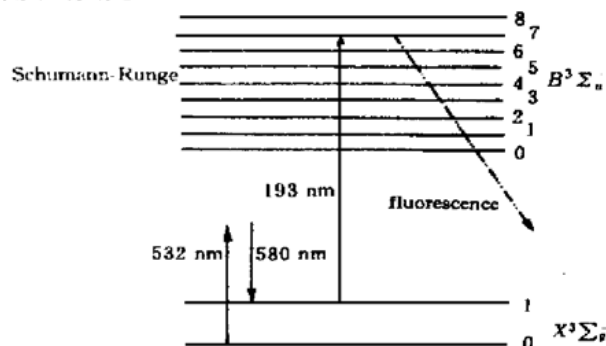


Fig. 1 The diagram of energy level for O₂

3 实验装置

拉曼激发激光诱导电子荧光整个系统包括四个主要部分: 532 nm 和 580 nm 激光光源; 193 nm 激光光源; 高灵敏度 CCD 摄像机; 时序控制及图像采集与处理系统。实验装置如图 2 所示。下面分别对系统的各个部分进行简单的介绍。

3.1 532 nm 和 580 nm 激光光源

532 nm 和 580 nm 激光通过拉曼激发过程将 O₂ 分子从 $X^3\Sigma_g^-(\nu=0)$ 态激发到 $X^3\Sigma_g^-(\nu=1)$ 态, 此激发过程效率较低, 要求激光具有较高的功率

密度。532 nm 激光为电光调 QNd: YAG 激光器的二次谐波, 脉冲宽度为 15 ns, 脉冲能量为 80 mJ。采用 532 nm 激光抽运氧气的受激拉曼散射, 一阶斯托克斯光的波长为 580 nm, 由于受激拉曼散射过

程和流场中的拉曼激发过程从分子能级跃迁的角度来看, 是完全相同的, 此方法产生的 580 nm 激光的波长精确地满足“标记”过程的需要。但受激拉曼散射存在严重的热效应^[4]。

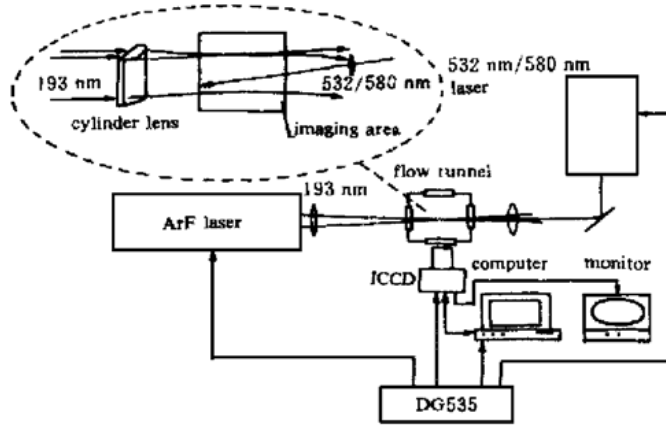


Fig. 2 Experimental setup for RELIEF velocimetry system

532 nm 抽运光为序列脉冲工作时, 无法得到完整的 580 nm 序列脉冲输出, 替代的方案是结合和频的光参量振荡器^[5]。在实验初期, 首先以单脉冲方式工作, 为了减少不确定因素, 仍可采用受激拉曼散射的方案。我们设计的受激拉曼散射实验装置如图 3 所示, 拉曼池为直径 20 mm、长 2 m 的不锈钢管, 池内充以 60 大气压的纯氧。为了提高受激拉曼散射的效率, 采用了染料超荧光注入的方法: 将倍频过程中剩余的 1064 nm 基频光再用一块 KTP 晶体

倍频, 获得的 532 nm 激光经整形、聚焦后抽运若丹明 6G 和若丹明 B 的混合溶液, 产生峰值波长为 580 nm 的染料荧光, 注入到拉曼池中。抽运受激拉曼散射的 532 nm 激光经适当的延时后与染料荧光同时注入拉曼池中。

实验表明, 采用染料荧光注入后, 受激拉曼散射的效率提高了近一倍。当抽运强度为每个脉冲 80 mJ 时, 可以获得每个脉冲 18 mJ~ 20 mJ 的 580 nm 激光。

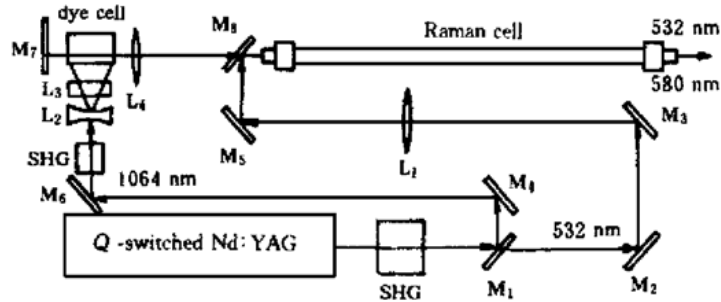


Fig. 3 Experimental setup of SRS in O₂. M₁: HR at 1064 nm and HT at 532 nm; M₄, M₆: HR at 1064 nm; M₂, M₃, M₅: 45° HR at 532 nm; M₇: HR at 580 nm; M₈: HT at 580 nm and HR at 532 nm; L₁~ L₄: lens

3.2 193 nm 激光光源

“标记”线的再现过程中, 需将“标记”态的氧分子激发到舒曼-龙格能级上, 实现 X(1) - B(7) 的跃迁, 以发出荧光, 而由氧气的吸收光谱可知, X(0) - B(4) 的跃迁与 X(1) - B(7) 的跃迁非常接近, 且处于 X(0) 的基态氧分子的数量非常多, 必将产生很强的背景干扰, 为了克服干扰, 要求用于激发的 193 nm 激光光源是窄线宽、可调谐的。为了获得较高的能量, ArF 准分子激光器采用了振荡-放大机

构, 振荡级的调谐元件为 3600 l/mm 的紫外光栅, 以掠入射方式工作, 可获得线宽为 0.025 nm、调谐范围为 192.9 nm~ 193.8 nm、脉冲能量为 2 mJ 左右的输出, 注入非稳腔结构的放大级。经放大后, 脉冲能量可达到 40 mJ^[6]。

3.3 CCD 摄像机及图像处理系统

舒曼-龙格能级上氧分子的发光效率很低, 因而荧光强度十分微弱, 需采用像增强的 CCD 摄像机 (ICCD)。荧光寿命很短, 持续时间基本与 193 nm

激光脉冲同步(约 10 ns),为了抑制环境杂散光的干扰,ICCD 摄像机上的像增强器应是带门电路的,即只有当一个“开门”脉冲(此脉冲的延时及宽度均可调)到达时,才有图像增强的作用,而其他时刻,像增强器关闭,使环境杂散光不能进入 CCD 摄像机。CCD 摄像机拍摄到的图像经图像捕捉卡转换成数字信号,输入到计算机中,进行显示和处理。

3.4 时序控制系统

超音速流场速度可达几百 m/s,为了获得高的测量精度,时序控制的精度应达到亚微秒的量级。拉曼激发激光诱导电子荧光系统的时序控制由脉冲延迟发生器 DG350(Stanford Research 公司)完成,它可以输出四路延时精度达皮秒量级的脉冲。整个系统的时序关系如图 4 所示:当时序控制器 DG350 受到外部信号触发后,产生四路时间控制信号,一路信号经接口触发 Nd:YAG 激光器,控制波长 532 nm、580 nm 激光脉冲输出。第二路触发 ArF 准分子激光器,脉冲在 532 nm、580 nm 出光后 1 μ s 输出。在 DG350 触发 ArF 准分子激光器的同时,第三路触发脉冲发生器,ICCD 快门打开,拍摄荧光图像。由于 ICCD 开门时间不能过长,否则过多的背景光会使图像的信噪比降低,影响图像质量,同时考虑到激光脉冲在时序上稍有抖动(1 μ s~2 μ s),所以将 ICCD 开门时间设为 3 μ s。第四路信号触发图像卡,捕捉 ICCD 所拍摄的荧光图像,然后将其输送到计算机的内存中。

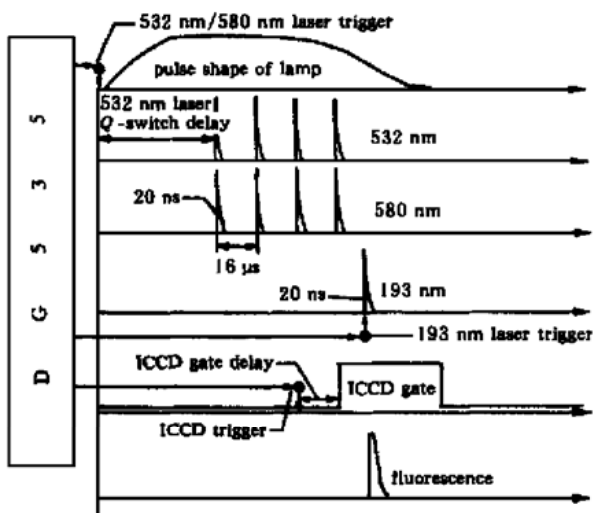


Fig. 4 The time orders of all apparatuses in train pulses RELIEF system

实验区域的光路布局如图 2 的左上角所示,193 nm 激光经一个柱透镜聚焦成片状,532/580 nm 激光束与 193 nm 光束重合,焦点位于成像区的中心。

4 实验结果

虽然受激拉曼散射不能以序列脉冲方式工作,但该方法所产生的 580 nm 激光对于标记过程有波长自动匹配的优点,在初步的实验中,为了尽量减少整个系统中的不确定因素,采取了单脉冲工作方式,以 O₂ 的受激拉曼散射产生 580 nm 激光。首先,利用上述系统,在常压氧气池(工业用氧)中进行了气体标记和再现实验,对氧气激发态的寿命进行了研究。

图 5 和图 6 为 193 nm 再现光脉冲相对于 532 nm 和 580 nm 激发光脉冲不同延时条件下获得的荧光标记线。



Fig. 5 Fluorescence with delay of 2 μ s in O₂



Fig. 6 Fluorescence with delay of 65 μ s in O₂

从上列各图中可以看出,在工业纯的氧气中,氧分子标记线在延迟 65 μ s 后,再现时荧光强度没有明显下降,说明荧光寿命远大于 65 μ s,序列脉冲拉曼激发激光诱导电子荧光系统中激光脉冲间隔为 20 μ s 时,可以保证 3~4 个脉冲标记线的再现,证明了序列脉冲拉曼激发激光诱导电子荧光方案在纯氧中是可行的。

在成功地获得了静止氧气中的荧光图像之后,我们又进行了氧气喷流的测速实验。图 2 的流场布局图中,成像区下方放置一个氧气喷嘴,在成像区内形成氧气喷流,首先确定标记线的初始位置,存入参考图像,然后在喷流的情况下,拍摄一定时间延迟后的标记荧光的位置,与参考图像进行比较,测出标记线在延迟的时间间隔中的移动距离,确定流场速

度和分布。结果如图 7 和图 8 所示。初步估算, 氧气喷流的速度约为 30 m/s。



Fig. 7 Reference line



Fig. 8 Fluorescence with delay of 20 μ s

另外, 我们又进行了空气中的标记测量实验, 实验对象为实验室中实际的环境空气, 温度约 25 $^{\circ}$ C, 湿度较大, 标记线的荧光图像如图 9 所示。

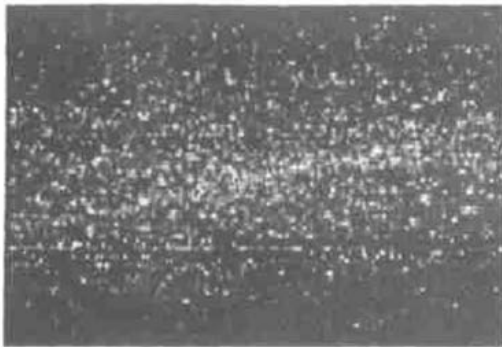


Fig. 9 Fluorescence with delay of 2 μ s in air

由于空气中的氧气含量只有 21%, 因而在相同的标记光源强度下, 空气中获得的荧光图像比纯氧中弱得多。另外, 实验还发现, 当再现激光脉冲相对于标记脉冲的延迟超过 2 μ s 后, 荧光图像变得非常弱, 已无法分辨, 说明空气中的标记寿命很短, 不适合于脉冲间隔较大的序列脉冲方式工作。其原因是空气中的三原子分子如 CO_2 、水蒸气等, 存在与氧分子振动能级接近的谱线, 会对激发态氧分子产生强烈的弛豫, 从而使标记态的寿命大大降低。所以在序列脉冲拉曼激发激光诱导电子荧光系统, 必须对

风洞中的空气进行干燥。

图 5~ 图 9 中的荧光存在一定的弥散, 其原因可能有两种: 一是气体本身的扩散运动造成标记线的弥散, 二是 CCD 镜头存在像差及调焦不准。这些问题可通过计算机软件处理, 确定荧光“重心”位置加以解决。荧光图中, ArF 激光的范围内存在一定的背景光, 这是由于 ArF 激光的线宽不够窄, 未能完全避开基态氧分子的吸收峰, 从而激发基态氧分子产生荧光所致。另外, 在图 9 中还可以看到存在一些很亮的荧光点, 这是空气中的灰尘散射造成的, 在实际测量时, 应对风洞中的空气进行除尘处理。

5 分析与结论

这套拉曼激发激光诱导电子荧光流场测速系统可以进行初步的测速实验; 序列脉冲拉曼激发激光诱导电子荧光方法在原理上是正确的, 在实验技术上是完全可行的; 序列脉冲拉曼激发激光诱导电子荧光系统要求风洞流场的气源必须经过除尘和干燥处理。

目前存在的主要问题是空气中的标记强度不够, 荧光图像的对比度不好, 其解决的方法, 一是增加 532/580 nm 标记光源的脉冲能量, 提高标记强度。但 532/580 nm 激光脉冲的功率密度要受到空气击穿阈值的限制, 此方法存在一定的局限; 另一种方法是进一步压缩 193 nm 再现光源的线宽, 抑制背景, 提高信噪比。通过分析氧气的吸收光谱, 可以知道, 当 193 nm 激光的谱线宽度小于 1 cm^{-1} (约 0.003 nm) 时, 能够完全避开基态氧分子的吸收谱线, 并获得较高的激发效率。压缩线宽可能的方案是在准分子激光器的谐振腔内插入标准具, 然而目前国内在紫外波段的镀膜存在一定的困难, 此方法在技术上的难度较大, 相应的成本也较高。对于小型实验风洞, 一种现实可行的方法是在气源中加入一定的纯氧, 提高氧气含量, 以达到提高荧光强度的目的。

参 考 文 献

- [1] Miles R, Cohen C, Connors J *et al.*. Velocity measurements by tagging and fluorescent probing of oxygen. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 861~ 863
- [2] Miles R, Connors J, Markovitz E *et al.*. Instantaneous profiles and turbulence statistics of supersonic free shear layers by Raman excitation plus laser-induced electronic fluorescence velocity tagging of oxygen. *Experiments in*

- Fluids*, 1989, **8**(1): 17~ 24
- [3] 郑 义, 姚建铨, 吴 峰 等. 用修正的 RELIEF 方法测量高速空气流瞬时速度的理论研究. 光学学报, 1996, **16**(8): 1148~ 1151
- [4] 吴 峰, 施翔春, 王学礼 等. 序列脉冲倍频 YAG 激光器泵浦的氧气受激拉曼散射研究. 光学学报, 1997, **17**(3): 275~ 278
- [5] 施翔春, 吴 峰, 于意仲 等. 脉冲泵浦 KTP 单谐振光学参量振荡器. 中国激光, 1997, **A24**(1): 59~ 62
- [6] 王 杰, 吴 峰, 施翔春 等. ArF 准分子激光器的窄线宽可调谐运转及注入放大. 中国激光, 1997, **A24**(9): 782~ 786

Tagging Procedures of Raman Excitation Plus Laser Induced Electronic Fluorescence Flow Velocimetry

Shi Xiangchun Wang Jie Xiao Xuhui Wang Xiaoyong Wang Peng Yao Jianquan
(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Optoelectronic Information Science and Technology Lab., Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 5 April 1999; revised 29 October 1999)

Abstract: The Raman excitation plus laser induced electronic fluorescence air flow velocimetry system is constructed. The second harmonics of Nd: YAG laser and stimulated Raman scattering in O₂ are employed as “tagging” laser source. The tagged line was interrogated with an ArF excimer laser. The laser-induced fluorescence images from tagged lines in O₂ and air are captured by an intensity-CCD Camera. The velocity measurement of O₂ jet is carried out.

Key words: Raman excitation plus laser induced electronic fluorescence (RELIEF); fluorescence image; tagging