



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117907257 B

(45) 授权公告日 2024. 11. 08

(21) 申请号 202410162246.2

G01N 21/01 (2006.01)

(22) 申请日 2024.02.05

G01M 9/02 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117907257 A

(56) 对比文件

CN 108981953 A, 2018.12.11

CN 112697738 A, 2021.04.23

(43) 申请公布日 2024.04.19

审查员 张鸿淋

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 林鑫 杨俊娜 方思晗 李仁杰

付依帆 李飞 余西龙

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 席卷

(51) Int. Cl.

G01N 21/31 (2006.01)

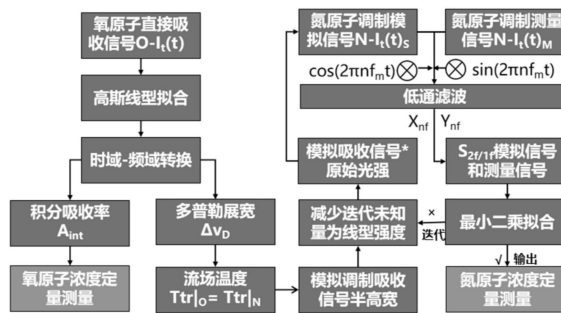
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法

(57) 摘要

本发明提供了一种高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其利用波长扫描直接吸收光谱方法测量氧原子信号,然后通过高斯线型函数直接拟合氧原子的直接吸收光谱信号,实现流场温度和氧原子浓度的定量测量;利用波长调制吸收光谱方法测量氮原子信号,然后进行氮原子调制信号线型轮廓模拟,计算氮原子调制模拟吸收信号且在计算过程中将流场温度代入,实现氮原子调制模拟吸收信号中温度变量的自标定,即可求得氮原子浓度精确值。本发明构思合理,利用氧原子直接吸收光谱信号对氮原子调制信号中温度变量进行自标定,即可实现氮原子浓度的精确测量,又能实现对高焓非平衡流场环境下热防护材料表面氧氮原子浓度的同时测量。



1. 一种高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其特征在于:利用波长扫描直接吸收光谱方法测量氧原子信号,然后通过高斯线型函数直接拟合氧原子的直接吸收光谱信号,实现流场温度和氧原子浓度的定量测量;利用波长调制吸收光谱方法测量氮原子信号,然后进行氮原子调制信号线型轮廓模拟,计算氮原子调制模拟吸收信号且在计算过程中将流场温度代入,实现氮原子调制模拟吸收信号中温度变量的自标定,即可求得氮原子浓度精确值;

所述氧原子的直接吸收光谱信号在扣除背景基线后,可实现高斯线型函数的快速拟合,即可求得氧原子在求解波长处的积分吸收率和多普勒展宽,实现流场温度和氧原子浓度的定量测量;所述多普勒展宽 Δv_D 的表达式如下:

$$\Delta v_D = 2 \times \frac{v_0}{c} \left(\frac{2kT_{tr} \ln 2}{m} \right)^{1/2} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T_{tr}}{M}};$$

其中, T_{tr} 为流场温度, M 为相对原子质量, v_0 为谱线中心频率, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, m 是单个原子的质量;

所述氧原子的直接吸收光谱信号获得的流场温度等同于氮原子一次谐波归一化的二次谐波信息获得的流场温度信息;

所述测量的方法具体包括以下步骤:

(1) 对氧原子的直接吸收信号轮廓信息进行解析

基于激光吸收光谱原理,当一束频率为 ν 的激光穿过待测流场,其透射光强与入射光强满足Beer-Lambert定律,在均匀流场中表示为:

$$(I_t/I_0)_\nu = \exp(-k_\nu \cdot L);$$

其中 $I_t(\nu)$ 和 $I_0(\nu)$ 分别为透射光强和入射光强, L 为吸收长度, k_ν 为吸收系数,其表达式如下:

$$k_\nu = S_{ij} n_i \phi_\nu;$$

其中, n_i 表示低能级原子浓度, ϕ_ν 表示吸收线型函数,满足归一化特性:

$$\int \phi_\nu d\nu = 1;$$

S_{ij} 表示吸收线强度,表达式如下:

$$S_{ij} = \left(\frac{\lambda_0}{8\pi c} \right) A_{ij} \frac{g_j}{g_i};$$

其中, $\lambda_0, g_j, g_i, A_{ij}$ 分别代表波长、上能级统计权重、下能级统计权重和爱因斯坦自发辐射系数,可通过NIST光谱数据库获得;

氧原子的吸收率 α_ν 是吸收系数 k_ν 和吸收光程 L 的乘积:

$$\alpha_\nu = k_\nu \cdot L = \left(\frac{\lambda_0}{8\pi c} \right) A_{ij} \frac{g_j}{g_i} \cdot n_i \cdot \phi_\nu \cdot L;$$

氧原子在求解波长处的积分吸收率 A_{int} 为 α_ν 关于频率 ν 的积分:

$$A_{int} = \int \alpha_\nu d\nu;$$

则低能级原子浓度 n_i 可以由下式获得:

$$n_i = \frac{A_{int}}{\lambda_0 L (g_j/g_i) (A_{ij}/8\pi c)} = \frac{\int k_\nu d\nu}{\lambda_0 (g_j/g_i) (A_{ij}/8\pi c)};$$

(2) 接下来对氮原子的波长调制光谱信息进行解析
氮原子激光器经高频调制后输出的频率响应可描述为:

$$v(t) = \bar{v}(t) + a \cos(2\pi f_m t);$$

其中, $\bar{v}(t)$ 为未调制时的氮原子激光器频率, a 为调制深度, f_m 为调制频率;

在上述的高频调制下, 氮原子激光器的输出光强也会呈现同样频率的周期性变化:

$$I_t(t) = \bar{I}_0(1 + i_0 \cos(2\pi f_m t + \varphi));$$

其中, \bar{I}_0 为未调制时的氮原子激光器输出光强, i_0 为光强调制系数, φ 为波长调制和光强调制间的相位差;

n 次谐波的 X 方向分量和 Y 方向分量, 使用低通滤波器处理后, 可以分别表示为下列形式:

$$X_{nf}: I_t(t) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \otimes LP-filter;$$

$$Y_{nf}: I_t(t) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \otimes LP-filter;$$

滤波后的波长调制 n 次谐波信号的绝对幅度可以表示为:

$$S_{nf} = \sqrt{X_{nf}^2 + Y_{nf}^2};$$

(3) 最后使用一次谐波去归一化二次谐波信号进行免标定, 去除非吸收损耗对谐波分析的影响, 则可以得到:

$$C = \frac{S_{2f}}{S_{1f}};$$

其中, S_{2f} 为二次谐波信号, S_{1f} 为一次谐波信号。

2. 如权利要求 1 所述的高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法, 其特征在于: 所述测量方法通过实验系统进行测量结果验证, 且所述实验系统包括信号发生器、氧原子激光控制器、氮原子激光控制器、氧原子激光器、氮原子激光器、光纤耦合器、准直器、感应耦合等离子体装置、光电探测器和示波器;

所述信号发生器通过其两个信号输出端分别与所述氧原子激光控制器和氮原子激光控制器的电压调制端电连接; 所述氧原子激光控制器还与所述氧原子激光器电连接, 所述氮原子激光控制器还与所述氮原子激光器电连接;

所述光纤耦合器匹配设置在所述氧原子激光器和氮原子激光器的出光侧, 用于接收由所述氧原子激光器和氮原子激光器发出的激光并将激光耦合处理;

所述准直器匹配设置在所述光纤耦合器的出光侧, 用于接收经所述光纤耦合器耦合处理后输出的光束并将光束准直处理;

所述光电探测器匹配设置在所述准直器的出光侧且与所述示波器电连接; 所述光电探测器用于探测由所述准直器输出的光束并将光信号转换为电信号; 所述示波器用于显示电信号的波形;

所述感应耦合等离子体装置匹配设置在所述准直器与探测器之间的区域, 用于产生待测流场;

同一台所述信号发生器产生一个半锯齿波信号和一个叠加着高频正弦波动的半锯齿波信号,两个信号的相位差为 180° ,分别输入所述氧原子激光控制器和氮原子激光控制器的电压调制端,所述激光控制器通过电流和温度控制所述氧原子激光器和氮原子激光器的输出光强,经所述光纤耦合器两束激光经同一所述准直器进行光路准直后穿过待测流场,由一台所述光电探测器接收,并使用所述示波器记录所述光电探测器输出信号;

两个半锯齿波合并成整锯齿波,前半周期为所述氧原子激光器对应直接吸收信号,后半周期为所述氮原子激光器对应调制吸收信号;通过将求解得到的流场温度代入到氮原子的谐波吸收信号解析中,可实现耐热材料表面氮原子浓度的测量。

3. 如权利要求2所述的高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其特征在于:所述待测流场由2kW的所述感应耦合等离子体装置通过线圈放电电离石英管内通入气体产生且通气流量由流量计控制。

4. 如权利2所述的高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其特征在于:所述待测流场可为所述感应耦合等离子体装置产生的局部化学热平衡等离子体环境,也可为高频等离子体风洞或电弧风洞产生的高焓离解化学非平衡气体环境。

5. 如权利要求2所述的高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其特征在于:两个半锯齿波信号的幅度选择时,应使所述氧原子激光器和氮原子激光器的扫描间隔有一段无光区域,所述无光区域可用于监测环境背景光信号和目标流场的辐射信号,作为背景基线扣除背景光和流场自发辐射的干扰。

一种高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及高超声速飞行器气动热防护研究领域,具体涉及一种高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法。

背景技术

[0002] 高超声速飞行器再入大气层时,受到激波压缩或粘性阻滞减速作用,导致周围流场压力和温度急剧升高,空气中的氧、氮分子发生离解,形成高焓化学非平衡等离子体环境。离解的高活性氧、氮原子在材料表面处会发生催化复合、氧化氮化等反应,释放出大量的化学反应热。其中氮原子的浓度随着焓值的增加而增加,其与飞行器表面碳原子发生的氮化烧蚀反应不可忽略,可能会破坏飞行器结构,威胁飞行安全。因此为精确预测再入过程中的热载荷,保障飞行安全,实现与材料表面物理化学反应进程相关的氮原子浓度测量极为必要。

[0003] 但是实现氮原子浓度的准确定量测量极具挑战性。在这种高焓非平衡环境下,传统的测量方法如探针法会对流场产生干扰不再适用,非侵入式的光谱测量方法可基于原子能级跃迁信息同时获得多组分浓度和温度信息,是目前的研究热点,主要包括发射光谱方法(OES)、激光诱导荧光方法(TALIF)、吸收光谱测量方法(LAS)等。其中发射光谱方法主要探测激发态的粒子从高能级跃迁至低能级时产生的自发辐射,而氮原子可能会与其他分子或原子发生碰撞,导致能级跃迁的频率和强度发生变化。这种碰撞效应会对测量结果产生干扰,需要进行修正或校正。并且发射光谱法的适用条件对等离子体环境具有较多要求,例如温度、压力和化学反应条件等,均会影响定标结果。因此高焓非平衡环境下发射光谱受限于背景信号的干扰、标定困难等因素,很难实现氮原子绝对浓度的定量测量。

[0004] 利用激光诱导荧光方法测量氮原子浓度时,对于每个测量位置,激光在吸收跃迁附近的窄波长范围内被调谐,但荧光强度往往与氮原子浓度之间存在复杂的非线性关系,量化原子浓度需要复杂的信号强度校准和荧光寿命、激光束直径和检测效率的测量。此外荧光系统的搭建也较为复杂,需要庞大的光源和精密的激光设备。受限于以上难点,通过此方法获得精确的氮原子定量结果也较为困难。可调谐吸收光谱测量技术利用原子基态粒子的吸收响应,电子能量跃迁至更高能级,从而造成测量光强的减弱以实现原子浓度的反映,具有测量系统简单、高时间分辨率等优势。流场中氧原子基态数目较多,吸收率较强,可以利用直接吸收光谱技术得到氧原子吸收谱线的展宽,进而求解得到氧原子浓度(见发表论文:Fang,SH;Lin,X;Zeng,H,et al.Gas-surface interactions in a large-scale inductively coupled plasma wind tunnel investigated by emission/absorption spectroscopy,Physics of Fluids,34:082113,2022)。然而,氮原子的高能级能量较高,吸收率较低,因此为得到信噪比较高的测量信号,对于氮原子的测量需要利用波长调制策略提升测量灵敏度,但是氮原子波长调制一次谐波归一化的二次谐波模拟信号线型轮廓解析困难,其半宽和强度信息中包含了温度和氮原子浓度两个未知量,无法直接求解,迭代得到的参数结果并不唯一,很难得到氮原子浓度的精确值。

发明内容

[0005] 针对高焓非平衡环境下氮原子浓度难以精确测量的问题,本发明提出了一种高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其基于氮原子模拟调制信号中温度变量自标定的方法,通过使用直接吸收光谱和波长调制光谱及时分复用的探测策略,利用氧原子直接吸收光谱信号对氮原子调制信号中温度变量进行自标定,突破氮原子模拟调制吸收信号的解析难题,即可实现氮原子浓度的精确测量,又能实现对高焓非平衡流场环境下热防护材料表面氧氮原子浓度的同时测量。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供的一种高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其利用波长扫描直接吸收光谱方法测量氧原子信号,然后通过高斯线型函数直接拟合氧原子的直接吸收光谱信号,实现流场温度和氧原子浓度的定量测量;利用波长调制吸收光谱方法测量氮原子信号,然后进行氮原子调制信号线型轮廓模拟,计算氮原子调制模拟吸收信号且在计算过程中将流场温度代入,实现氮原子调制模拟吸收信号中温度变量的自标定,即可求得氮原子浓度精确值。

[0007] 所述高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其中,所述氧原子的直接吸收光谱信号在扣除背景基线后,可实现高斯线型函数的快速拟合,即可求得氧原子在求解波长处的积分吸收率和多普勒展宽,实现流场温度和氧原子浓度的定量测量;所述多普勒展宽 Δv_D 的表达式如下:

$$[0008] \quad \Delta v_D = 2 \times \frac{v_0}{c} \left(\frac{2kT_{tr} \ln 2}{m} \right)^{1/2} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T_{tr}}{M}};$$

[0009] 其中, T_{tr} 为流场温度, M 为相对原子质量, v_0 为谱线中心频率, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, m 是单个原子的质量。

[0010] 所述高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其中:所述氧原子的直接吸收光谱信号获得的流场温度等同于氮原子一次谐波归一化的二次谐波信息获得的流场温度信息。

[0011] 所述高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其中,所述测量的方法具体包括以下步骤:

[0012] (1) 对氧原子的直接吸收信号轮廓信息进行解析

[0013] 基于激光吸收光谱原理,当一束频率为 ν 的激光穿过待测流场,其透射光强与入射光强满足 Beer-Lambert 定律,在均匀流场中表示为:

$$[0014] \quad (I_t/I_0)_\nu = \exp(-k_\nu \cdot L);$$

[0015] 其中 $I_t(\nu)$ 和 $I_0(\nu)$ 分别为透射光强和入射光强, L 为吸收长度, k_ν 为吸收系数,其表达式如下:

$$[0016] \quad k_\nu = S_{ij} n_i \phi_\nu;$$

[0017] 其中, n_i 表示低能级原子浓度, ϕ_ν 表示吸收线型函数,满足归一化特性:

$$[0018] \quad \int \phi_\nu d\nu = 1;$$

[0019] S_{ij} 表示吸收线强度,表达式如下:

$$[0020] \quad S_{ij} = \left(\frac{\lambda_0}{8\pi c} \right) A_{ij} \frac{g_j}{g_i};$$

[0021] 其中, λ_0 , g_j , g_i , A_{ij} 分别代表波长、上能级统计权重、下能级统计权重和爱因斯坦自发辐射系数,可通过 NIST 光谱数据库获得;

[0022] 氧原子的吸收率 α_v 是吸收系数 k_v 和吸收光程 L 的乘积:

$$[0023] \quad \alpha_v = k_v \cdot L = \left(\frac{\lambda_0}{8\pi c} \right) A_{ij} \frac{g_j}{g_i} \cdot n_i \cdot \phi_v \cdot L;$$

[0024] 氧原子在求解波长处的积分吸收率 A_{int} 为 α_v 关于频率 ν 的积分:

$$[0025] \quad A_{int} = \int \alpha_v dv;$$

[0026] 则低能级原子浓度 n_i 可以由下式获得:

$$[0027] \quad n_i = \frac{A_{int}}{\lambda_0 L (g_j/g_i) (A_{ij}/8\pi c)} = \frac{\int k_v dv}{\lambda_0 (g_j/g_i) (A_{ij}/8\pi c)};$$

[0028] (2) 接下来对氮原子的波长调制光谱信息进行解析

[0029] 氮原子激光器经高频调制后输出的频率响应可描述为:

$$[0030] \quad \nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cos(2\pi f_m t);$$

[0031] 其中, $\bar{\nu}(t)$ 为未调制时的氮原子激光器频率, a 为调制深度, f_m 为调制频率;

[0032] 在上述的高频调制下,氮原子激光器的输出光强也会呈现同样频率的周期性变化:

$$[0033] \quad I_t(t) = \bar{I}_0 (1 + i_0 \cos(2\pi f_m t + \varphi));$$

[0034] 其中, \bar{I}_0 为未调制时的氮原子激光器输出光强, i_0 为光强调制系数, φ 为波长调制和光强调制间的相位差;

[0035] n 次谐波的 X 方向分量和 Y 方向分量,使用低通滤波器处理后,可以分别表示为下列形式:

$$[0036] \quad X_{nf}: I_t(t) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \otimes LP-filter;$$

$$[0037] \quad Y_{nf}: I_t(t) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \otimes LP-filter;$$

[0038] 滤波后的波长调制 n 次谐波信号的绝对幅度可以表示为:

$$[0039] \quad S_{nf} = \sqrt{X_{nf}^2 + Y_{nf}^2};$$

[0040] (3) 最后使用一次谐波去归一化二次谐波信号进行免标定,去除非吸收损耗对谐波分析的影响,则可以得到:

$$[0041] \quad C = \frac{S_{2f}}{S_{1f}};$$

[0042] 其中, S_{2f} 为二次谐波信号, S_{1f} 为一次谐波信号。

[0043] 所述高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其中:所述测量方法通过实验系统进行测量结果验证,且所述实验系统包括信号发生器、氧原子激光控制器、氮原子激光控制器、氧原子激光器、氮原子激光器、光纤耦合器、准直器、感应耦合等离子体装置、光电探测器和示波器;

[0044] 所述信号发生器通过其两个信号输出端分别与所述氧原子激光控制器和氮原子激光控制器的电压调制端电连接;所述氧原子激光控制器还与所述氧原子激光器电连接,所述氮原子激光控制器还与所述氮原子激光器电连接;

[0045] 所述光纤耦合器匹配设置在所述氧原子激光器和氮原子激光器的出光侧,用于接收由所述氧原子激光器和氮原子激光器发出的激光并将激光耦合处理;

[0046] 所述准直器匹配设置在所述光纤耦合器的出光侧,用于接收经所述光纤耦合器耦合处理后输出的光束并将光束准直处理;

[0047] 所述光电探测器匹配设置在所述准直器的出光侧且与所述示波器电连接;所述光电探测器用于探测由所述准直器输出的光束并将光信号转换为电信号;所述示波器用于显示电信号的波形;

[0048] 所述感应耦合等离子体装置匹配设置在所述准直器与探测器之间的区域,用于产生待测流场;

[0049] 同一台所述信号发生器产生一个半锯齿波信号和一个叠加着高频正弦波动的半锯齿波信号,两个信号的相位差为 180° ,分别输入所述氧原子激光控制器和氮原子激光控制器的电压调制端,所述激光控制器通过电流和温度控制所述氧原子激光器和氮原子激光器的输出光强,经所述光纤耦合器两束激光经同一所述准直器进行光路准直后穿过待测流场,由一台所述光电探测器接收,并使用所述示波器记录所述光电探测器输出信号;

[0050] 两个半锯齿波合并成整锯齿波,前半周期为所述氧原子激光器对应直接吸收信号,后半周期为所述氮原子激光器对应调制吸收信号;通过将求解得到的流场温度代入到氮原子的谐波吸收信号解析中,可实现耐热材料表面氮原子浓度的测量。

[0051] 所述高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其中:所述待测流场由2kW的所述感应耦合等离子体装置通过线圈放电电离石英管内通入气体产生且通气流量由流量计控制。

[0052] 所述高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其中:所述待测流场可为所述感应耦合等离子体装置产生的局部化学热平衡等离子体环境,也可为高频等离子体风洞或电弧风洞产生的高焓离解化学非平衡气体环境。

[0053] 所述高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,其中:两个半锯齿波信号的幅度选择时,应使所述氧原子激光器和氮原子激光器的扫描间隔有一段无光区域,所述无光区域可用于监测环境背景光信号和目标流场的辐射信号,作为背景基线扣除背景光和流场自发辐射的干扰。

[0054] 采用上述技术方案,本发明具有如下有益效果:

[0055] 本发明高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法构思合理,基于流场温度自标定策略实现氮原子浓度定量测量,对氮原子调制信号解析中的温度变量利用氧原子直接吸收信号进行自标定,即可得到氮原子浓度的精确值。

[0056] 本发明提出的非平衡环境下耐热材料表面氮原子浓度的解析方法,对氧原子信号采用直接吸收,对氮原子信号采用波长调制,两者进行时分复用处理。相比于波长调制解析,直接吸收信号处理直观简单,可快速解析出氧原子浓度和流场温度信息,将获得的温度数值代入到氮原子一次谐波归一化的二次谐波模拟信号的迭代过程中,拟合处理后可高效准确地获得氮原子浓度的唯一确定值;解析方法新颖,具有同时测量氧氮原子浓度分布的能力。

[0057] 本发明利用氧原子的直接吸收信号处理结果进行标定氮原子的调制模拟信号,可以得到精确的氮原子浓度值,避免了氮原子模拟调制信号谐波分析过程中温度和浓度两个变量共同迭代导致的误差较大和难以定量性。

[0058] 本发明针对不同吸收率特点的氧、氮原子分别采用波长直接扫描吸收方法和波长调制光谱方法,并利用时分复用策略进行同时测量,可以简化计算过程并可以实现低吸收率波长调制信号的高效精确解析。

附图说明

[0059] 为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案下面将对具体实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施方式,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0060] 图1为本发明高焓非平衡流场下氮原子浓度的测量方法的具体实施方案流程图;

[0061] 图2为本发明高焓非平衡流场下氮原子浓度的测量方法涉及的未经过待测流场吸收的单周期原始信号示意图;

[0062] 图3为本发明高焓非平衡流场下氮原子浓度的测量方法涉及的经过待测流场吸收后的单周期测量信号示意图;

[0063] 图4为本发明高焓非平衡流场下氮原子浓度的测量方法涉及的氧原子直接吸收光谱高斯型线型轮廓示意图;

[0064] 图5为本发明高焓非平衡流场下氮原子浓度的测量方法涉及的氮原子波长调制光谱一次谐波归一化二次谐波信号示意图;

[0065] 图6为本发明高焓非平衡流场下氮原子浓度测量方法中涉及的实验系统的结构连接原理图。

具体实施方式

[0066] 下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0067] 下面结合具体的实施方式对本发明做进一步的解释说明。

[0068] 本发明高焓非平衡流场氮原子浓度测量的方法,是利用波长扫描直接吸收光谱方法测量氧原子信号,然后通过高斯线型函数直接拟合氧原子的直接吸收光谱信号,实现流场温度和氧原子浓度的定量测量;利用波长调制吸收光谱方法测量氮原子信号,然后进行氮原子调制信号线型轮廓模拟,计算氮原子调制模拟吸收信号且在计算过程中将流场温度代入,实现氮原子调制模拟吸收信号中温度变量的自标定,即可求得氮原子浓度精确值。

[0069] 如图1所示,本发明高焓非平衡流场氮原子浓度测量方法,具体流程如下:

[0070] 首先对氧原子的直接吸收信号轮廓信息进行解析:

[0071] 基于激光吸收光谱原理,当一束频率为 ν [cm^{-1}]的激光穿过待测气体流场,其透射光强与入射光强满足Beer-Lambert定律,在均匀流场中表示为:

$$[0072] \quad (I_t/I_0)_\nu = \exp(-k_\nu \cdot L);$$

[0073] 其中 $I_t(\nu)$ 和 $I_0(\nu)$ 分别为透射光强和入射光强, L [cm]为吸收长度, k_ν [cm^{-1}]为吸收系数,其表达式如下:

$$[0074] \quad k_\nu = \sum_i S_i n_i \phi_\nu;$$

[0075] 其中, n_i [cm^{-3}] 表示低能级原子浓度, ϕ_v [cm] 表示吸收线型函数, 满足归一化特性:

$$[0076] \quad \int \phi_v dv \equiv 1;$$

[0077] S_{ij} [$\text{cm}/\text{molecule}$] 表示吸收线强度, 表达式如下:

$$[0078] \quad S_{ij} = \left(\frac{\lambda_0}{8\pi c}\right) A_{ij} \frac{g_j}{g_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_0 k_B T_{ex}}\right)\right];$$

[0079] 对于本实施例选用的氧原子777nm吸收线, 在本实验工况下上式可简化为:

$$[0080] \quad S_{ij} = \left(\frac{\lambda_0}{8\pi c}\right) A_{ij} \frac{g_j}{g_i};$$

[0081] 氧原子的吸收率 α_v 是吸收系数 k_v 和吸收光程 L 的乘积:

$$[0082] \quad \alpha_v = k_v \cdot L = \left(\frac{\lambda_0}{8\pi c}\right) A_{ij} \frac{g_j}{g_i} \cdot n_i \cdot \phi_v \cdot L;$$

[0083] 氧原子在求解波长处的积分吸收率 A_{int} 为 α_v 关于频率 ν 的积分:

$$[0084] \quad A_{int} = \int \alpha_v dv;$$

[0085] 则低能级原子浓度 n_i 可以由下式获得:

$$[0086] \quad n_i = \frac{A_{int}}{\lambda_0 L (g_j/g_i) (A_{ij}/8\pi c)} = \frac{\int k_v dv}{\lambda_0 (g_j/g_i) (A_{ij}/8\pi c)};$$

[0087] 吸收线型轮廓的展宽机制主要包括多普勒展宽、压力展宽和Stark展宽。在发明涉及的高温低压实验工况下, 压力展宽比多普勒展宽小两个数量级, 因此压力展宽对吸收线型的影响可以忽略。多普勒展宽 $\Delta \nu_D$ 为主要展宽机制, 流场温度 T_{tr} [K] 可由下式单独获得:

$$[0088] \quad \Delta \nu_D = 2 \times \frac{v_0}{c} \left(\frac{2kT_{tr} \ln 2}{m}\right)^{1/2} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T_{tr}}{M}};$$

[0089] 其中, T_{tr} [K] 为流场温度, M [g/mol] 为相对原子质量, v_0 [cm^{-1}] 为谱线中心频率, c [m/s] 为光速, k 为玻尔兹曼常数, m [kg] 是单个原子的质量, M [g/mol] 为相对原子质量; 依据氧原子直接吸收光谱信号获得的流场温度等同于氮原子一次谐波归一化的二次谐波信息获得的流场温度信息。

[0090] 接下来对氮原子的波长调制光谱信息进行解析:

[0091] 氮原子激光器经高频调制后输出的频率响应可描述为:

$$[0092] \quad \nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cos(2\pi f_m t);$$

[0093] 其中, $\bar{\nu}(t)$ 为未调制的氮原子激光器频率, a 为调制深度, f_m 为调制频率。

[0094] 在上述的波长调制下, 激光器的输出光强也会呈现同样频率的周期性变化:

$$[0095] \quad I_t(t) = \bar{I}_0 (1 + i_0 \cos(2\pi f_m t + \varphi));$$

[0096] \bar{I}_0 为未调制时的激光器输出光强, i_0 为光强调制系数, φ 为波长调制和光强调制间的相位差。

[0097] n 次谐波的X方向分量 (测量信号乘以 $\cos 2\omega t$) 和Y方向分量 (测量信号乘以 $\sin 2\omega t$), 使用低通滤波器处理后, 可以分别表示为下列形式:

$$[0098] \quad X_{nf}: I_t(t) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \otimes LP\text{-filter};$$

[0099] $Y_{nf}: I_t(t) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \otimes LP-filter;$

[0100] 滤波后的波长调制n次谐波信号的绝对幅度可以表示为:

$$[0101] \quad S_{nf} = \sqrt{X_{nf}^2 + Y_{nf}^2};$$

[0102] 最后使用1f (一次谐波) 去归一化2f (二次谐波) 信号进行免标定, 去除非吸收损耗的影响, 则可以得到:

$$[0103] \quad C = \frac{S_{2f}}{S_{1f}};$$

[0104] 为实现对比值的解析, 需要利用模拟吸收信号乘以原始光强, 得到模拟透射光强信号, 之后采用上述免标定步骤进行低通滤波, 去除高频噪声、平滑信号, 进而提升信噪比。得到模拟信号的归一化比值去进行和原始测量信号的归一化比值的拟合, 在拟合过程中需对模拟吸收信号进行不断迭代。由于该归一化谐波信号包含了温度和原子浓度两个未知量, 迭代结果无法精确获得氮原子浓度唯一定量解。

[0105] 本发明提出根据氧原子直接吸收信号得到氧原子浓度和流场温度, 将温度代入到氮原子波长调制信号解析过程中, 温度已知, 则模拟吸收信号的吸收线型半高宽已知, 只需对吸收线型强度这唯一未知量进行迭代, 即可获得唯一确定的调制模拟吸收信号, 与测量信号分别进行一次谐波归一化二次谐波信号处理, 得到上述比值参数, 若两者的最小二乘拟合效果较好, 即可输出氮原子浓度的唯一真实解。

[0106] 如图6所示, 本发明高焓非平衡流场氮原子浓度测量的方法, 是通过实验系统进行测量结果验证; 该实验系统包括信号发生器、氧原子激光控制器、氮原子激光控制器、氧原子激光器、氮原子激光器、光纤耦合器、准直器、感应耦合等离子体装置、光电探测器和示波器。

[0107] 该信号发生器通过两个信号输出端分别与氧原子激光控制器和氮原子激光控制器的电压调制端电连接; 该氧原子激光控制器与该氧原子激光器电连接, 该氮原子激光控制器与该氮原子激光器电连接。

[0108] 该光纤耦合器匹配设置在该氧原子激光器和氮原子激光器的出光侧, 用于接收由该氧原子激光器和氮原子激光器发出的激光并将激光耦合处理。

[0109] 该准直器匹配设置在该光纤耦合器的出光侧, 用于接收经光纤耦合器耦合处理后输出的光束并将光束准直处理。

[0110] 该光电探测器匹配设置在该准直器的出光侧, 用于探测由准直器输出的光束并将光信号转换为电信号; 该光电探测器与该示波器电连接; 该示波器用于显示电信号的波形。

[0111] 该感应耦合等离子体装置位于准直器与探测器之间的区域, 待测流场由2kW的感应耦合等离子体装置通过线圈放电电离石英管内通入气体产生, 进气流量由流量计控制, 空气为18sccm, 氩气为2sccm, 压强为10Pa。

[0112] 本发明明确氧原子采用直接吸收光谱方法, 氮原子采用波长调制光谱策略。其中, 实验系统中, 同一台信号发生器产生一个半锯齿波信号和一个叠加着高频正弦波动的半锯齿波信号, 两个信号的相位差为 180° , 分别输入氧原子激光控制器和氮原子激光控制器通过电流和温度控制氧原子激光器和氮原子激光器的输出光强, 经光纤耦合器两束激光经同

一准直器进行光路准直后穿过待测流场,由一台光电探测器接收。

[0113] 图2展示了没有经过待测流场吸收情况下的单周期原始信号,前半周期为一个半锯齿波信号(扫描频率为100kHz,扫描幅度为2.6V),后半周期为一个叠加着高频正弦波动的半锯齿波信号(扫描频率为100Hz,扫描幅度为2V,调制频率为25kHz,调制幅度为0.1V),其中两个半锯齿波扫描间隔有一小段无光区域,这一信号平台可用于监测环境背景光信号和目标流场的辐射信号。

[0114] 图3展示了经过待测流场吸收情况下的单周期测量信号示意图,前半周期为氧原子激光器对应吸收信号,后半周期为氮原子对应调制吸收信号。

[0115] 图4展示了氧原子直接吸收光谱吸收率的高斯型线型轮廓示意图,中心波长为777nm,可根据该线型模拟得到谱线半高宽,即可获得流场温度,可通过谱线的积分吸收率进一步定量求解氧原子浓度。

[0116] 图5展示了氮原子波长调制一次谐波归一化二次谐波信号,中心波长为868nm,该线型的模拟比较复杂,需要不断迭代吸收率线型函数和原始光强相乘得到模拟透射信号,再经过低通滤波处理得到归一化的谐波信息进行最小二乘拟合。将氧原子直接吸收信号处理得到的温度信息代入氮原子吸收谐波信号处理中,固定温度参数,减少迭代未知量,降低氮原子吸收波长调制信号的解析难度,可得到氮原子浓度的唯一真实解。

[0117] 本发明构思合理,利用氧原子直接吸收光谱信号对氮原子调制信号中温度变量进行自标定,即可实现氮原子浓度的精确测量,又能实现对高焓非平衡流场环境下热防护材料表面氧氮原子浓度的同时测量。

[0118] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

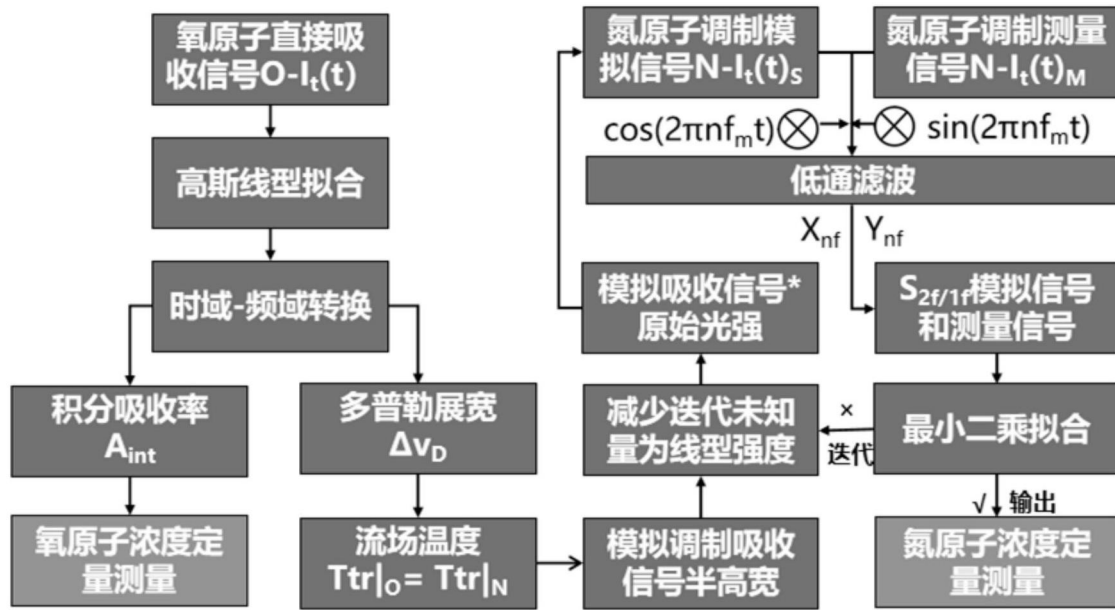


图1

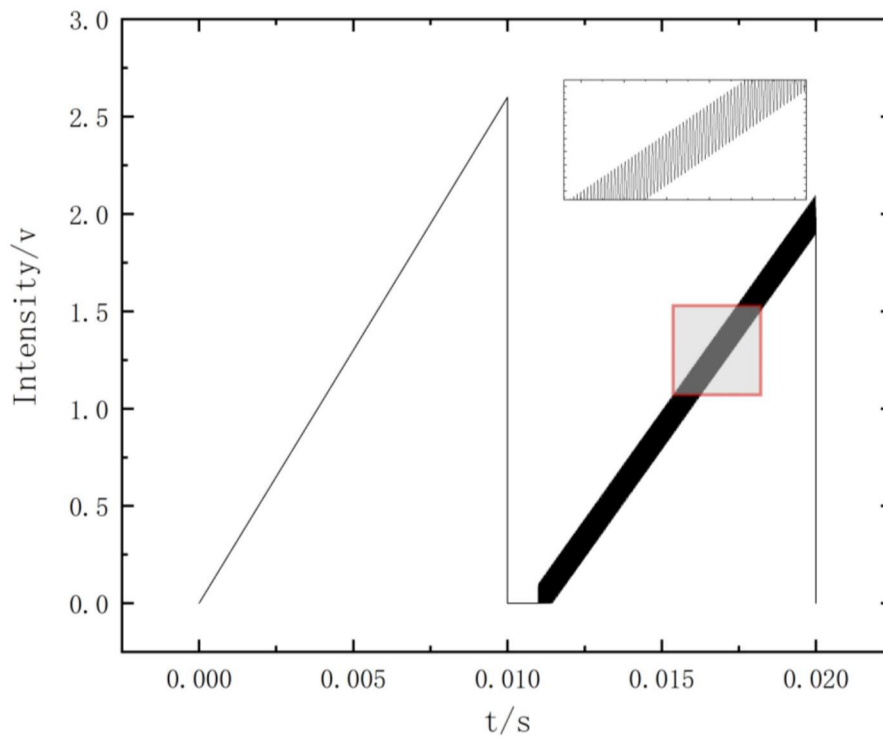


图2

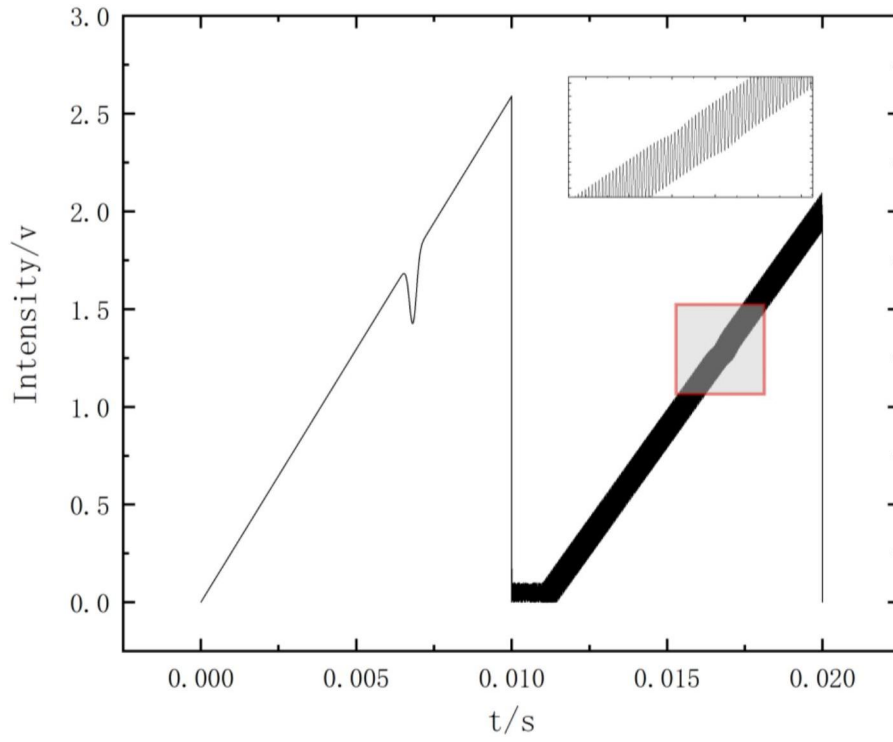


图3

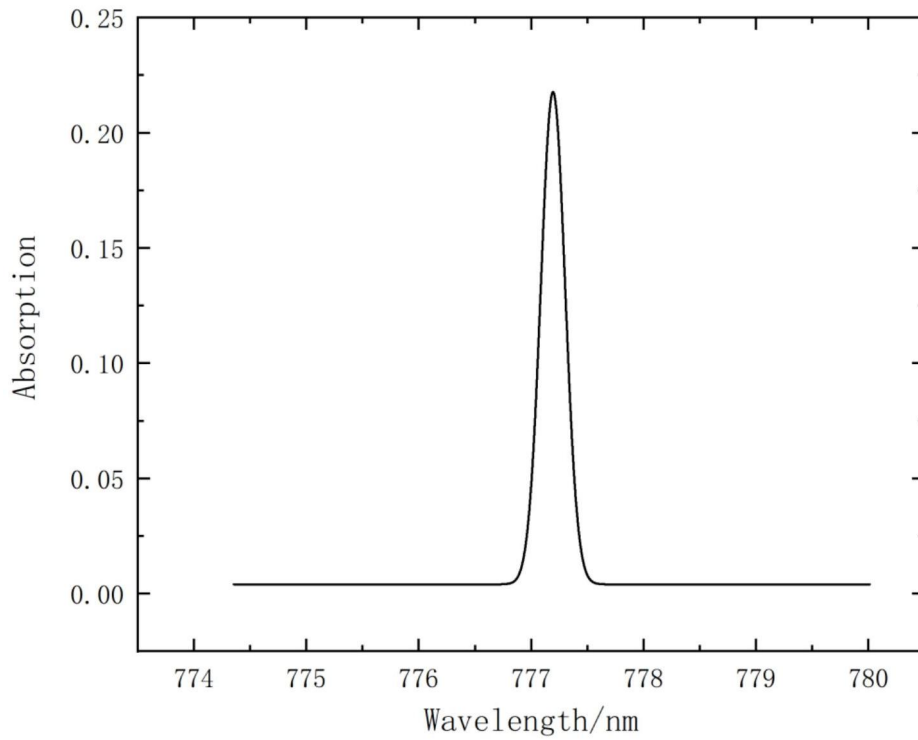


图4

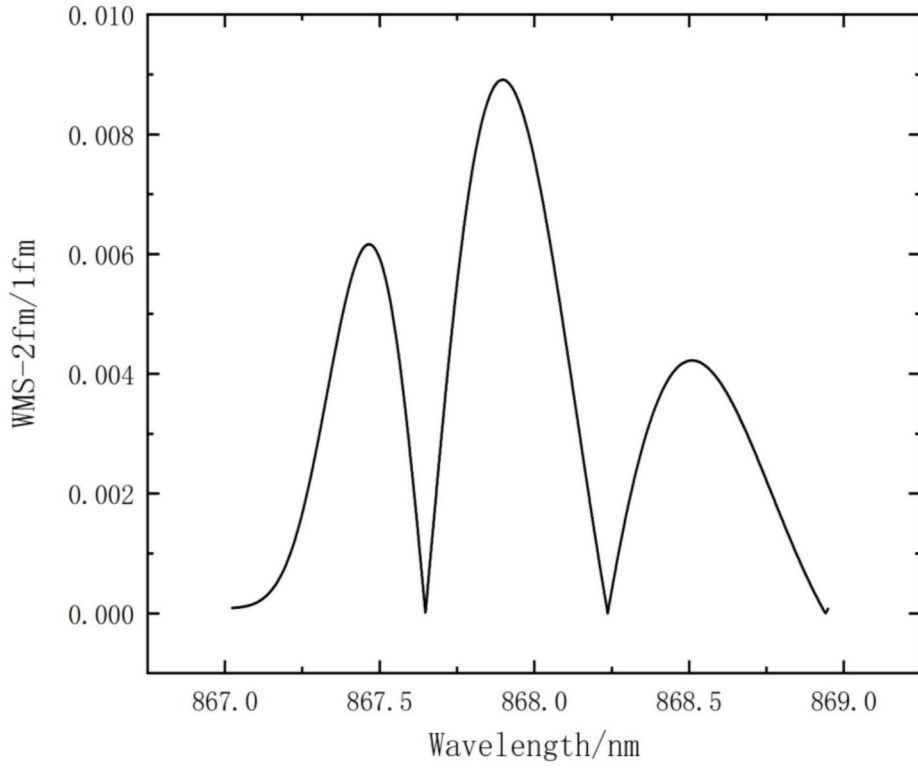


图5

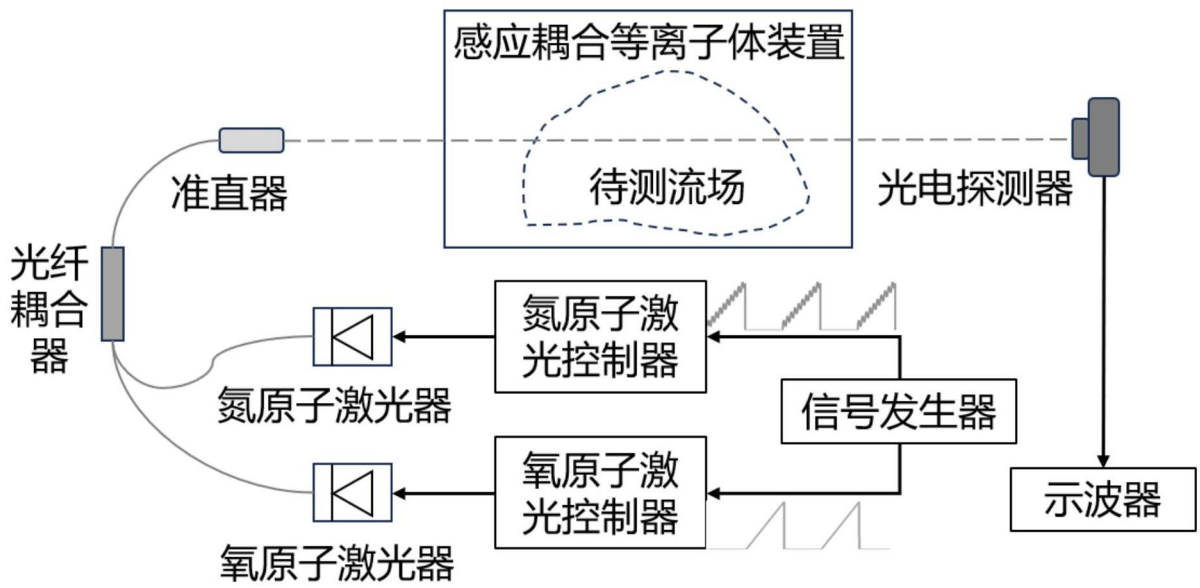


图6