

文章编号: 1001—4322(2000) s0—0025—06

# 体光源模拟标定法测 $O_2(^1\Delta)$ 绝对浓度\*

多丽萍, 崔铁基, 王增强, 陈文武, 桑凤亭

(中国科学院大连化学物理研究所, 大连市 110 信箱, 116023)

**摘 要:**  $O_2(^1\Delta)$  绝对浓度的测量, 一直是 SOG 和 CO L 研究中的重要参数之一。体光源模拟标定法测  $O_2(^1\Delta)$  绝对浓度, 是把发光气体以某一流速引入一已知体积的流动光池中, 再通过具有低象差失真的光学系统, 将该体光源成象在探测器的有效表面上。探测器和测量仪器组成的测量系统, 要经过标准光源和电学标定。本方法可测出  $O_2(^1\Delta)$  绝对浓度及其分压,  $O_2(^1\Delta)$  产率等参数。其中  $O_2(^1\Delta)$  浓度测量结果的相对误差为 20%。

**关键词:**  $O_2(^1\Delta)$  绝对浓度; 体光源模拟法

**中图分类号:** TN 248.5 **文献标识码:** A

$O_2(^1\Delta)$  是 CO L 的能量, CO L 输出的功率直接与  $O_2(^1\Delta)$  的绝对浓度有关,  $O_2(^1\Delta)$  是由单重态氧发生器(SOG)产生的,  $O_2(^1\Delta)$  的绝对浓度是 SOG 和 CO L 的重要参数之一, 因此测量 SOG 出口处的  $O_2(^1\Delta)$  绝对浓度具有重要意义。

人们研究不同 SOG 的性能时, 也探索了各种测量  $O_2(^1\Delta)$  浓度的方法, 如文献[1]曾部分概括的那样, 核磁共振法比较昂贵; 光电离光谱法, 位于真空紫外, 灵敏度低易受干扰; 质谱法准确度不高; 发射光谱法<sup>[2]</sup>包括 Raman 光谱法<sup>[3]</sup>其谱线强度较难以准确标定; 量热法<sup>[1]</sup>主要适用于小型 SOG, 而规模一大, 漏检等误差因素增大; 吸收光谱法<sup>[4]</sup>提出了利用可调谐二极管激光器, 测基态氧的方法和文献[5]提出了利用光腔衰荡光谱(Cavity Ring-Down Spectroscopy)可测基态氧的方法等, 是  $O_2(^1\Delta)$  浓度的间接测试方法, 且信噪比仍需进一步提高。

本文依据塞式光源-Piston source(PS)法测速率常数的原理<sup>[6]</sup>, 设法解决了光池设计, 光学标定, 猝灭修正和弱信号检测等技术问题, 成功地将体光源模拟标定法(实际上它是一个均匀可滑动的圆盘光源)应用于  $O_2(^1\Delta)$  绝对浓度的测量。

## 1 测量原理

任何一个光源或发光体, 其发光是向  $4\pi$  立体角发射的。对一个点光源而言, 相对于收集系统如透镜, 其收集立体角是容易确定的。但当一个较大体光源, 被一个小口径的光学系统收集时, 收集立体角难以确定。体光源模拟标定法引入均匀可滑动的圆盘光源, 实质上是测量圆柱发光体的等效立体角。圆盘的半径远小于透镜到圆盘光源的距离时, 圆盘光源可视为点光源。

如果把实际的  $O_2(^1\Delta)$  发光体, 让其以一定的流速通过一个不透明的圆柱限定的体积-光池, 这时测量光学系统收集到的光辐射所对应的  $O_2(^1\Delta)$  发光体积是已知的。由滑动圆盘光源对圆柱体光源所对应的平均位置作出标定, 即可知圆柱体光源在平均位置上所对应的立体角。

PS 结构见图 1, 也即实验部分的图 3 中的放大图,

做为一个整体, 它与光池内径做滑动配合可任意移动。近似点光源的小灯泡放在焦距为  $f$  的最小象差透镜的焦点上, 产生的平行光经毛玻璃变成均匀的漫散射光。它的亮度  $B_{ps}$  由标准钨带灯标定(详见附

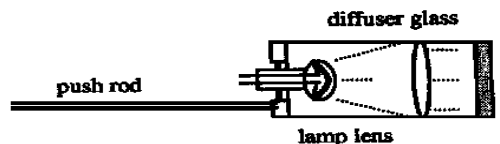


Fig 1 Piston source

图 1 活塞式光源

\* 收稿日期: 2000-08-20; 修订日期: 2000-10-25  
基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-4-3)  
作者简介: 多丽萍(1968-), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为化学激光测试诊断及相关基础研究。

录)

$$B_{PS} = B_c \left( \frac{S_{PS}}{S_S} \right) \left( \frac{A_L}{A_{PS}} \right) \left( \frac{a^2}{L^2} \right) \quad (1)$$

式中各项物理意义见附录。

### 1.1 光源等效立体角和探测器的灵敏度

先取下窗口 1 (见图 3), 把 PS 放入光池中, 做体光源模拟标定。取发光圆盘 (毛玻璃) 与窗口 2 接触时为坐标零点, 小灯泡由标准稳压电源供电, 其供电电流必须与 PS 亮度标定时一致。当 PS 在光池内移动时可得到信号强度随位置坐标的相关曲线——体光源模拟曲线, 如图 2。这就是用圆盘式均匀光源的移动, 来模拟这个圆柱腔体中的  $O_2(^1\Delta)$  自发辐射体光源。可以认为, PS 在任何位置上都与具有相同位置上的体光源元相对应, 而且相对应的立体角是相同的。把该曲线沿着光池长度  $l_{cell}$  方向积分, 其积分值  $S_{PS}^V$  就是该圆盘式均匀光源模拟的圆柱体光源所发出, 并为探测器系统全部接收的光子能量转变成的电信号。在数值上等于 PS 位于平均位置  $\bar{l}_{cell}$  处的信号  $\bar{S}_{PS}$  与光池长度  $l_{cell}$  之积 (矩形面积)

$$S_{PS}^V = \bar{S}_{PS} l_{cell} \quad (2)$$

因此, 圆柱体光源发出的光相当于位于平均位置的圆盘光源, 其亮度为原亮度的  $l_{cell}$  倍所发出的光。

在  $\bar{l}_{cell}$  位置的圆盘光源对探测系统所张的立体角为  $\theta_{real}$ , 当然也应是圆柱体所限定的体光源的等效发光立体角。那么 PS 发出的并为探测器所接收的光子流率 (Photon/s) 应是

$$P_{PS} = (B_{PS} \cdot l_{cell}) \cdot A_{PS} \Delta\lambda (\lambda/hc) \theta_{real} \quad (3)$$

则探测器的灵敏度为

$$\xi_{PS} = \frac{P_{PS}}{S_{PS}^V} = B A_L \Delta\lambda \left( \frac{\lambda}{hc} \right) \theta_{real} \left( \frac{a^2}{L^2} \right) \left( \frac{S_{PS}}{S_{PS} S_S} \right) \quad (4)$$

### 1.2 绝对光子流率

在进行  $O_2(^1\Delta)$  自发辐射测量时, 要抽出 PS, 封闭窗口 1。这时探测器系统测出的是等效于  $\theta_{real}$  立体角内收集的  $O_2(^1\Delta)$  体光源转变成的电信号  $S_V$ 。若换算成  $4\pi$  立体角的总辐射光子速率  $\Sigma P_V$  为

$$\Sigma P_V = \xi_{PS} S_V \left( \frac{4\pi}{\theta_{real}} \right) \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式则有

$$\Sigma P_V = 4\pi B A_L \Delta\lambda \left( \frac{\lambda}{hc} \right) \left( \frac{S_{PS}}{S_{PS}} \right) \left( \frac{S_V}{S_S} \right) \left( \frac{a^2}{L^2} \right) \quad (6)$$

$$\text{令} \quad I_s = B A_L \Delta\lambda (\lambda/hc) \quad (7)$$

$I_s$  为标准光源单位立体角内的光子流率。

如果  $a=L$ , 则(6)式化为和文献[7]相同的形式

$$\delta P_V = 4\pi I_s \left( \frac{S_{PS}}{S_{PS}} \right) \left( \frac{S_V}{S_S} \right) \quad (8)$$

本方法的特点是:

1. 要保证 PS 标定与实验探测时的几何条件不变, 式中的  $\theta_{real}$  这个难以计算的立体角就可消掉。
2. PS 的面积  $A_{PS}$  也可消掉, 其制造误差不引入测试结果。

### 1.3 $O_2(^1\Delta)$ 的绝对浓度和 $O_2(^1\Delta)$ 产率

$O_2(^1\Delta)$  的自发辐射是通过下面反应实现的

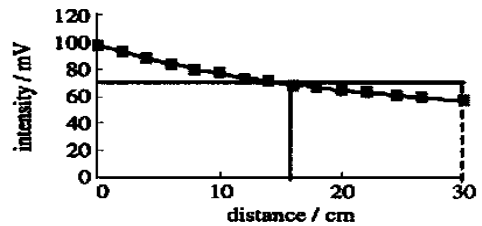


Fig. 2 The signal intensity as a function of the piston source position along the tube

图 2 模拟体光源光强分布

在上述反应中, Einstein 自发辐射系数  $A$  在不同文献中区别较大, 如  $2.580 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  [8],  $2.577 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  [9],  $2.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  [10],  $2.31 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  [2]。本文取最近发表的值  $2.31 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。它的物理意义是表示一个分子(原子)自发辐射进入全部线宽和  $4\pi$  立体角的几率。因此体积为  $V$ , 浓度为  $[\text{O}_2(^1\Delta)]$  时,  $\text{O}_2(^1\Delta)$  的自发跃迁的分子速率(molec/s)为

$$n = V [\text{O}_2(^1\Delta)] A \tag{10}$$

探测的 1270nm 光子流率与  $\text{O}_2(^1\Delta)$  自发辐射的速率相等, 即式(6)和(10)应相等

$$V [\text{O}_2(^1\Delta)] A = \sum P_V \tag{11}$$

所以  $\text{O}_2(^1\Delta)$  的绝对浓度

$$[\text{O}_2(^1\Delta)] = \sum P_V / VA \tag{12}$$

可知  $\text{O}_2(^1\Delta)$  的分压  $p_\Delta$  为

$$p_\Delta = \sum P_V RT / VA \tag{12'}$$

式中,  $R$  为气体常数;  $T$  为测试点气体的绝对温度, 则  $\text{O}_2(^1\Delta)$  产率为

$$\eta = \sum P_V / VA [\sum \text{O}_2] \tag{13}$$

式中  $[\sum \text{O}_2]$  是 SOG 生成的总氧浓度, 可由下式求得

$$[\sum \text{O}_2] = \left( \frac{F_{\text{Cl}_2}}{F_{\text{Cl}_2} + F_{\text{He}}} \right) U_{\text{Cl}_2} \left( \frac{p_t}{RT} \right) \tag{14}$$

式中  $F_{\text{Cl}_2}$  为 SOG 的氯流量;  $F_{\text{He}}$  为 SOG 的氦流量;  $U_{\text{Cl}_2}$  为 SOG 的氯利用率;  $p_t$  为测试点总压。

### 2 实验部分

实验装置如图 3, 从 SOG 分流出来的  $\text{O}_2(^1\Delta)$  混合气流, 通过内径 40mm 的不锈钢光池后, 由真空泵以一定的速率抽走。其中的压力由薄膜式真空压力计测量, 光池由两个石英窗口封闭,  $\text{O}_2(^1\Delta)$  的自发辐射透过窗口 2, 经过内径 42mm 并涂黑的金属管(长 520mm)与  $f = 58\text{mm}$  的最小象差透镜连接, 经 40mm 的光阑, 成象在  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  的 J16TE-2-HSA 2 R05 Ge 探测器上, 制冷 -20℃, 由 5109 锁相放大器和计算机数据处理系统得到结果。

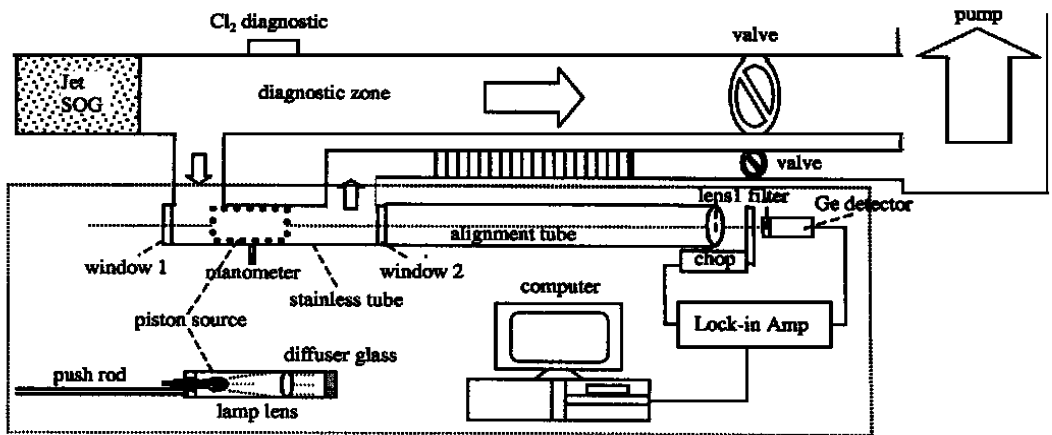


Fig 3 Schematic chart of the setup for the measurement of absolute concentration of  $\text{O}_2(^1\Delta)$  by the PS method

图 3 体光源模拟法测量  $\text{O}_2(^1\Delta)$  绝对浓度的装置示意图

### 3 结果与讨论

用体光源模拟法对射流式发生器出口处  $\text{O}_2(^1\Delta)$  的绝对浓度进行测量, 测得  $\text{O}_2(^1\Delta)$  的绝对分压和  $\text{O}_2(^1\Delta)$  的产率见表 1。

表 1 射流式  $O_2(^1\Delta)$  发生器  $O_2(^1\Delta)$  的分压和产率的实验结果

Table 1 A series of experimental results

Exp. no.	$S_V/mV$	$p_i/133.3Pa$	$N$	$U_{Cl_2}$	$p_{\Delta}/133.3Pa$	Yield
71001	64.0	28	3.94	0.77	2.0	0.50
71002	71.0	27	4.00	0.69	2.2	0.65
71003	74.0	27	4.23	0.69	2.3	0.71
71004	67.0	26	4.03	0.65	2.1	0.68
71005	66.0	26	4.15	0.62	2.0	0.72
71006	64.0	25	4.11	0.63	2.0	0.71
71007	64.0	28	4.36	0.57	2.0	0.73
71008	60.0	27	4.30	0.62	1.9	0.65
71009	62.0	25	4.53	0.57	1.9	0.83

Where,  $S_V$  is the intensity of 1270nm emission;  $p_i$ , the pressure of the stainless tube;  $N$ , the ratio of  $[He]/[Cl_2]$ ;  $U_{Cl_2}$ , the utility of  $Cl_2$ ;  $p_{\Delta}$ , the partial pressure of  $O_2(^1\Delta)$  (at 273K); Yield, the yield of  $O_2(^1\Delta)$ , that is,  $[O_2(^1\Delta)]/[^1\Delta O_2]$

从测得的结果看,射流式氧发生器中  $O_2(^1\Delta)$  的产率都在 50% 以上,它与发生器的工作参数有关,这方面的研究工作将以后讨论。用体光源模拟法测量  $O_2(^1\Delta)$  绝对浓度时我们考虑了以下问题,并进行了误差分析。

### 3.1 SOG 气流中的组分对 $O_2(^1\Delta)$ 猝灭的影响

在 SOG 出口处,可能存在的气体有:  $O_2(^1\Delta)$ ,  $O_2(^1\Sigma)$ ,  $O_2(^3\Sigma)$ ,  $Cl_2$ ,  $H_2O$ ,  $He$ ,  $H_2O_2$  等。其猝灭方程为

$$O_2(^1\Delta) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2(^1\Sigma) + O_2(^3\Sigma), \quad k_1 = 2.7 \times 10^{-17} \quad (15)$$

$$O_2(^1\Delta) + M \rightarrow O_2(^3\Sigma) + M \quad (16)$$

$M$  分别为  $O_2(^1\Delta)$ ,  $k_2 = 1.7 \times 10^{-17}$ ;  $O_2(^3\Sigma)$ ,  $k_3 = 4 \times 10^{-18}$ ;  $Cl_2$ ,  $k_4 = 1.6 \times 10^{-18}$ ;  $H_2O$ ,  $k_5 = 6 \times 10^{-18}$ ;  $He$ ,  $k_6 = 8 \times 10^{-21}$ , 其中各猝灭速率常数的单位都是  $cm^3/molec \cdot s$

SOG 中的  $H_2O_2$  饱和蒸汽压,仅是同温下水的饱和蒸汽压的 1/20,其猝灭速率常数又趋于零,所以  $H_2O_2$  的猝灭作用可忽略。 $He$  的猝灭速率常数比其它伙伴小几个数量级故也可忽略。在  $O_2(^1\Delta)$  传输过程中不断生成  $O_2(^1\Sigma)$ ,因为它与  $H_2O$  的猝灭速率常数较大 ( $k = 6.7 \times 10^{-12}$ ),故很快会达到稳态平衡,其浓度很小。这时的  $O_2(^1\Delta)$  动力学传输方程为<sup>[1]</sup>

$$d[O_2(^1\Delta)]/dt = - [O_2(^1\Delta)] \{ (k_1 + k_2) [O_2(^1\Delta)] + k_3 [O_2(^3\Sigma)] + k_4 [Cl_2] + k_5 [H_2O] + \dots \} \quad (17)$$

写成分压形式

$$dp_{\Delta}/dt = - p_{\Delta} (1/RT) \{ (k_1 + k_2) p_{\Delta} + k_3 p_3 + k_4 p_4 + k_5 p_5 + \dots \} \quad (18)$$

令上式中

$$\zeta' = (1/RT) \{ (k_1 + k_2) p_{\Delta} + k_3 p_3 + k_4 p_4 + k_5 p_5 + \dots \}, \quad 1/s \quad (19)$$

称为猝灭潜力。它表示猝灭伙伴单位时间内对  $O_2(^1\Delta)$  的猝灭潜力。如果把(19)与介质在光池中滞留时间  $\Delta t$  相乘,称为猝灭伙伴对  $O_2(^1\Delta)$  的猝灭能力。

$$\zeta = (\Delta t/RT) \{ (k_1 + k_2) p_{\Delta} + k_3 p_3 + k_4 p_4 + k_5 p_5 + \dots \} \quad (20)$$

它表示猝灭伙伴在  $\Delta t$  时间内,使  $O_2(^1\Delta)$  猝灭的数量的百分比。

本光池,设计的介质流速为 200m/s,滞留时间 1.5ms (光池和引管总长 0.3m)。在 Jet SOG 实验中,约有 1~2% 的  $O_2(^1\Delta)$  被猝灭。由于猝灭过程是一个渐变过程,因此对  $O_2(^1\Delta)$  分压的修正系数应该是 1.005~1.01。在介质流速小于 150m/s 时,猝灭影响因素较显著;而在流速大于 150m/s 时,这个影响可以忽略。

### 3.2 器壁对 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 的猝灭

各种器壁对 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 的猝灭是不同的, 其猝灭方程为

$$O_2(^1\Delta) + Wall \rightarrow O_2(^3\Sigma) + Wall \quad (21)$$

当光池为不锈钢材质, 其猝灭潜力  $\zeta' = 2 \times 10^{-5} (v/2R) (1/s)^{[11]}$ , 本设计光池中气体流速  $v = 200m/s$ , 半径  $R = 2cm$  时,  $\zeta' = 0.12 (1/s)$ 。当滞溜时间  $1.5ms$  (光池和引管总长  $0.3m$ ) 时猝灭能力  $\zeta = 3 \times 10^{-4}$ 。可见本设计和实验条件下, 光池器壁对 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 的猝灭影响可以忽略。

### 3.3 气流温度对测试结果的影响

依据前面的公式(12')计算, O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 分压随温度提高, 按  $2Pa/K$  增加。O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 产率随温度提高而增加约  $0.3\% \sim 0.4\%/K$ 。因此在温度变化不超过  $3$  度时温度影响可以忽略。

### 3.4 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 自发辐射线宽

O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 的自发辐射波长  $1270nm$ , 其碰撞加宽为  $1.9 \times 10^{-4} cm^{-1}$ , 其多普勒加宽为  $1.65 \times 10^{-2} cm^{-1}$ 。都远小于滤光片的带宽。另外, 在 SOG 气流中除  $1270nm$  的自发辐射外, 还有  $634, 703, 762nm$  较强的谱线辐射, 但都位于滤光片的带宽以外。所以线宽的影响可以忽略不计。

### 3.5 误差分析

依公式(12)可知, O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 绝对浓度的相对误差如表 2。

表 2 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 绝对浓度的相对误差

Table 2 Relative uncertainties

B <sub>c</sub> /%	A <sub>L</sub> /%	Δλ/%	a <sup>2</sup> /%	L <sup>2</sup> /%	S <sub>PS</sub> '/%	S <sub>PS</sub> /%	S <sub>V</sub> /%	S <sub>S</sub> /%	others/%
4	1	5	1	1	1	1	1	1	4

所以 [O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)] 测量总的相对误差为 20%。比较遗憾的是目前还没有另外一个 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 绝对浓度的测试方法可以与其比较, 其绝对精度尚不得而知。

### 3.6 应用限度

体光源模拟法, 对那些自发辐射寿命或荧光寿命较长的体光源, 是比较合适和有效的。但对那些寿命较短的体光源, 可能会因有严重的猝灭因素, 必须缩短光池的长度或设法加快气体的流速。但是长度太短会影响信号强度, 气体的流速增加也有一定的限度, 这很可能就是体光源模拟法推广时的限制。

致谢 本实验方法得到了马月仁, 王麟, 魏凌云, 吕国胜等同事在实验上的支持和许多有意义的讨论。

## 附录 PS 亮度的标定

可以在国家标准局直接标定 PS 在测量波段的亮度, 可一次性完成。但通常都是利用已标定的标准灯亮度, 再传递给 PS 的方法完成的, 这时要分两步进行。

### 第一 探测系统标定

已标定的钨带标准灯要与探测器系统有相当的距离, 如图 a。标准灯的供电条件, 必须满足说明书的要求。标定和测量时, 必须使用同一套测量仪器系统。这时探测器接收到的光子流 (photon/s) 为

$$P_c = B_c A_L \Delta\lambda (\lambda/hc) (\pi d^2/4L^2) \quad (a)$$

式中, B<sub>c</sub> 为标准灯在滤光片中心波长时的亮度,

W · cm<sup>-2</sup> · nm<sup>-1</sup> · sr<sup>-1</sup>; A<sub>L</sub> 为标准灯的发光面积,

cm<sup>2</sup>; Δλ 为滤光片的通带宽度 10nm; πd<sup>2</sup>/4L<sup>2</sup> 为透镜通光孔径对标准灯张的立体角, sr; d 为透镜的通光孔径, m; L 为标准灯与透镜主平面的距离, m; λ 为被测辐射的波长, m; h 为普朗克常数  $6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ ; c 为光速  $3 \times 10^8 m/s$ 。如果此时测量仪器测量到的信号幅度为 S<sub>s</sub>, 则探测系统的灵敏度系数为

$$\xi = P_c/S_s \quad (\text{photon/s} \cdot mV) \quad (b)$$

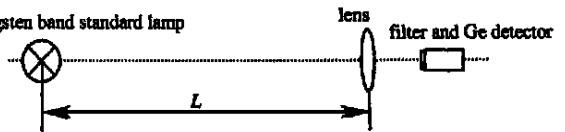


Fig a Calibration system setup

图 a 标定系统的光路图

## 第二 PS 系统的标定

装配好的 PS, 由标准的稳压电源供电, 其光路仍如图 a, 只是把原图中的标准灯换成 PS, 把距离  $L$  改成  $a$ , 测试系统不变。调节 PS 亮度与实际的体光源相近, 并锁定其供电条件。这时探测系统测量到的信号为 SPS, 由式 (a) (b) 可得 PS 的亮度为

$$B_{PS} = B_c \left( \frac{S_{PS}}{S_s} \right) \left( \frac{A_L}{A_{PS}} \right) \left( \frac{a^2}{L^2} \right) \quad (c)$$

式中,  $B_{PS}$  为 PS 的亮度  $W \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $B_c$  为标准灯在滤光片中心波长时的亮度  $W \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $S_{PS}$  为 PS 照明时, 探测系统输出的信号 mV,  $S_s$  为标准灯照明时, 探测系统输出的信号 mV,  $A_L$  为标准灯的发光面积  $\text{cm}^2$ ,  $L$  为标准灯与探测系统接收透镜主平面的距离 m,  $A_{PS}$  为 PS 的毛玻璃盘面积  $\text{cm}^2$ ,  $a$  为 PS 的毛玻璃圆盘面与探测系统接收透镜主平面的距离 m。

## 参考文献:

- [1] 宋雪琴, 张荣耀, 陈方, 等. 分析仪器 4, 1, 1987.
- [2] Spalek O, Kodymova J, Balek V, et al. A ttempt to verify experimentally Einstein a-coefficient used for  $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$  detemination in CO L [A ] SPIE[C]. 1998, **3574**: 550~ 559. XII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, 31 Aug - 5 Sep. 1998, St Petersburg, Russia
- [3] Gyls V T, Rubin L F. Direct measurement of  $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$  and  $\text{O}_2(\text{X}^1\Sigma)$  in chemical oxygen-iodine lasers with use of spontaneous Raman imaging[J]. *Appl Optics*, 1998, **37**(6): 1026
- [4] Allen M G, Carleton K L, Davis S J, et al. Diode laser-based measurements of water vapor and ground state oxygen in chemical oxygen iodine lasers[A ]. 25th A IAA Plasmadynamics and Lasers Conference[C]. A IAA paper 94-2433, Colorado Spring, CO, 1994
- [5] Xu Yong, Sheng Xinzhi, Sun Julong, et al. Cavity ring-down spectroscopic measurement of  $\text{O}_2(\text{b-x})$  [A ]. SPIE[C]. 1999, **3612**: 32
- [6] Wolsay G A, Lee P H, Slafer W D. Measurement of the rate constant for NO-O chemiluminescence using a calibrated piston source of light[J]. *J Chem Phys*, 1977, **67**(3): 1220
- [7] Lee P H, Wolsay G A, Slafer W D. Integration over cylindrical luminous volumes using a calibrated piston source[J]. *Appl Opt*, 1976, **15**(11): 2825
- [8] Badger R B, Wright A C, Whitloch R T. Absolute intensities of the discrete continuous bands of oxygen gas at 1.26 and 1.065  $\mu\text{m}$  and the radiative lifetime of the  $\text{a}^1\Delta_g$  state of oxygen[J]. *J Chem Phys*, 1965, **43**: 4345
- [9] Fisk G A, Hays N. Kinetic rates in the oxygen-iodine system[J]. *J Chem Phys*, 1982, **77**(10): 4965
- [10] Heidner R F, Gardner C F, et al. Temperature dependence of  $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta) + \text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$  and  $\text{I}(\text{P}_{1/2}) + \text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$  energy pooling[J]. *J Chem Phys*, 1981, **74**(10): 5618
- [11] Avizonics P V, Hason G, Truesdell M A. Chemically pumped oxygen-iodine lasers[A ]. SPIE[C]. 1990, **1225**: 448

## Absolute $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$ concentration measurement in singlet oxygen generator using the piston source method

DUO Liping, CU ITie-ji, WANG Zeng-qiang, CHEN Wen-wu, SANG Feng-ting

(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 110 Dalian 116023, China)

**ABSTRACT:** A calibrated piston source of light, which simulates a cylindrical-volume luminosity source, has been introduced to measure the absolute concentration of illuminant particles. It is proved that this Piston Source Method is one of the simplest and most convenient ways to measure the absolute concentration of illuminant particles, especially in real time measurements of  $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$  in a singlet oxygen generator. The relative error of  $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$  concentration is less than 20%.

**KEY WORDS:** absolute concentration; illuminant particles; piston source method