# 常压介质阻挡放电氧气大气谱带分析

谢维杰<sup>1,2</sup>,李龙海<sup>1,3</sup>,江举辉<sup>1</sup>,蔡伟民<sup>1</sup>

1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240

2. 海军潜艇学院,山东青岛 266071

3. 江苏大学环境科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

摘 要 观测了氧气常压介质阻挡放电过程产生的发射光谱,利用氧气大气谱带( $b^{1}$ ;  $x^{3}$ ;)转动结构 的拟合光谱与实验光谱的比较和氧原子发射谱线测量了等离子体的气体温度和电子温度;通过分析氧气常 见激发态( $a^{1}$ ; $b^{1}$ ; 和 $A^{3}$ ;)的产生和猝灭途径,结合氧气激发、解离过程的动力学数据,探讨了在大 气压介质阻挡放电条件下氧气大气谱带的产生原因。结果表明:在该实验条件下氧气常压介质阻挡放电时 电子温度(11 800 ±400) K远高于气体温度(650 ±20) K,由于 $a^{1}$ ;的辐射跃迁概率太小,且 $A^{3}$ ; 在高气 压下很容易被猝灭,实验中没有观测到这两个激发态的辐射,而测到了具有清晰转动结构的氧气大气谱带。

关键词 介质阻挡放电;氧气;大气谱带;发射光谱;电子温度;转动温度 中图分类号:O644 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-0878-05

## 引 言

介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)是用电 介质材料将电极(单电极或双电极)覆盖,以达到均匀放电的 低温等离子体技术<sup>[1]</sup>,主要特点是电子温度较高而重粒子 (分子、离子或原子)温度很低,并且设备简单、放电均匀、 能耗低、等离子体空间尺寸大,是一种最适合进行等离子体 化学反应的放电形式,目前已经在表面处理<sup>[2]</sup>、材料改 性<sup>[3,4]</sup>、臭氧生产和有害物质降解等领域越来越引起人们的 关注<sup>[5,6]</sup>。氧气是自然界中存在最普遍、参与化学反应最多 的气体之一,研究氧气在介质阻挡放电中的物理化学行为对 促进介质阻挡放电技术的应用很有帮助。

发射光谱法 (optical emission spectroscopy, OES) 是一种 不对等离子体产生扰动的原位在线等离子体诊断方法, 在测 量等离子体电子温度、振动温度和转动温度<sup>[7]</sup>, 分析原子分 子激发态种类和分布<sup>[8,9]</sup>, 研究反应机理和动力学过程<sup>[9]</sup>, 分析光辐射特性<sup>[10]</sup>等方面具有不可替代的优势。但由于氧 气的常见激发态 $(a^{1} g, b^{1} g, c^{1} g, A^{3} g, A^{3} t 和 B$ <sup>3</sup> 读等)都是长寿命的亚稳态,辐射跃迁概率比较小, 在高 气压放电时一般难以观测到分子的发射光谱, 给发射光谱诊 断增加了困难。相对来说, 从  $b^{1} g$  向基态 $(X^{3} g)$ )跃迁而 产生的大气谱带(也叫 A 带)是氧气发射光谱中特征最明显 且相对易于观测的带系。

多年来人们通过观测空间辉光<sup>[11,12]</sup>、地球极光<sup>[13]</sup>和彗 星余辉中氧气大气谱带的特征对地球大气层中氧气和臭氧分 布及组成形态、云层厚度及成分<sup>[14]</sup>等方面进行了研究,也有 人用氧气 A 带来分析有氧气参与的爆炸<sup>[15]</sup>、燃烧<sup>[16]</sup>和低气 压放电<sup>[17]</sup>中产生的活性基团。但未见到常压介质阻挡放电 中有关氧气大气谱带的研究报道。本文使用自制的中频谐振 电源,使氧气在常压介质阻挡条件下稳定放电,通过分析发 射光谱中原子谱线和氧气大气谱带的转动结构,计算了放电 过程中的电子温度和气体温度,探讨了氧气介质阻挡放电时 的激发和解离机理,分析了氧气大气谱带的产生原因。

# 1 实验装置与方法

实验所用的介质阻挡放电装置如图 1。反应器用石英玻 璃制成,电极为抛光的铜板,介质材料为 1 mm 厚的石英玻 璃,放电间隙 2 mm。放电气体为高纯氧气(99.995%),用气 体质量流量计控制流量为 1 L ·min<sup>-1</sup>,保持气体压力为 1 atm。放电所用的电源为自制的谐振电源,放电过程中用示 波器(Tektronix TDS5052)监测放电参数变化情况,分别用 Tektronix P6015A 高压探头和 Tektronix TCPA300 电流探 头测量放电电压和电流。

**收稿日期**:2007-12-06,**修订日期**:2008-03-19

作者简介:谢维杰,1964年生,上海交通大学环境科学与工程学院博士研究生 email:wjxie@sjtu.edu.cn

基金项目:上海市纳米专项基金项目(0752nm007)资助



Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

放电产生的辉光用石英透镜聚集后经光纤导入光谱仪 (Jobin Yvon Triax 320,测量范围 200~1 000 nm,分辨率 0.1 nm),光信号用带有 3 块光栅(分别为 1 200,1 800 和 1 800 g·mm<sup>-1</sup>)的焦距为 320 mm 的单色仪分光,经光谱分 析软件处理后从微机输出。

图 2 为稳定放电后的电压电流波形图。可以看出,本实 验条件下放电电压为 4 500 V,放电电流约 60 mA,频率为 37 kHz,为典型的丝状放电,每个微放电通道持续时间约 0.1 µs。





# 2 结果与讨论

#### 2.1 发射光谱

图 3 为稳定放电后 700~950 nm 范围的发射光谱。谱线 由一系列氧原子发射谱线和氧气的 A 带 O<sub>2</sub> ( $b^{1}$   $c^{+}_{g}$   $X^{1}$   $c^{-}_{g}$ ) 组成,最强的氧原子谱线(777.4 nm)的强度约为氧气 A 带强 度的 60 倍,增大测量时间可得到 A 带的清晰谱图(可先参见 图 5)。除图中所示外,还测到了 395.5,532.9,543.3, 604.8,625.6 和 645.5 nm 处的氧原子谱线。

#### 2.2 光谱分析

#### 2.2.1 氧原子谱线分析及电子温度计算

基态氧原子的电子组态为  $1s^2 2s^2 2p^4$ , O 原子发射谱线 是氧原子的一个 2p 电子被激发到高电子态以后,从高态向 低态跃迁时产生的发射光谱。实验中观测到了氧原子的多个 能态之间跃迁产生的发射谱线,产生这些辐射跃迁的原子谱 项包括:  ${}^1D$ ,  ${}^1D^0$ ,  ${}^1F$ ,  ${}^3S^0$ ,  ${}^3P$ ,  ${}^3P^0$ ,  ${}^3D$ ,  ${}^3D^0$ ,  ${}^3F$ ,  ${}^5S^0$ ,  ${}^5P$ 和 ${}^5D^0$ 等,图 4 给出了实验测到的氧原子谱线的跃迁能级, 标注每个能级的电子组态时省略了共同部分,分别是  $2s^2 2p^3$  $(^2D^0)$  (3s 和 3p)、 $2s^2 2p^3$  ( $^2P^0$ ) (3s 和 3p)及  $2s^2 2p^3$  ( $^4S^0$ ) (其余部分),图中斜线旁数字为谱线波长的实测值(nm),同 时以虚线标出了氧原子的第一电离能(13.618 eV)。







实验产生的介质阻挡放电由无数丝状微放电组成,在每 个微放电区域可看作达到了局部热力学平衡<sup>[18]</sup>,此时电子 温度 *T*。近似等于激发温度 *T*exc。对于同种原子的两条相近 谱线,有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_{1-2}}{A_2 g_{2-1}} \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{kT_e}\right)$$
(1)

式中, *E*为高态的能量, *I*为谱线强度, *A* 是爱因斯坦跃迁概率, *g* 是高态兼并度, 是波长, *k* 是玻尔兹兹曼常数。

通过 ln[(I<sub>1</sub> 1A<sub>2</sub> g<sub>2</sub>)/(I<sub>2</sub> 2A<sub>1</sub> g<sub>1</sub>)]~(E<sub>1</sub> - E<sub>2</sub>)图的斜率 即可估计等离子体区域的电子温度。

本实验中求得的电子温度为(1.02 ±0.03) eV,即 (11 800 ±400) K。

2.2.2 氧气的 A 带光谱分析及气体温度测量

氧气的基态  $X^3$  ; 由 J = N - 1, N, N + 1确定的能级组成, 是三重简并的, 只有 N 为奇数的态是对称性容许的; 而高态  $b^1$  ; 的 S = 0 时, 只有 N 为偶数且 N = J 的态是可用的。所以, 氧气的A带由包含 N, N, J, J 的四种跃迁组成, 分别表示为 $^{P}P$ ,  $^{P}Q$ ,  $^{R}Q$  和 $^{R}R$ 。从图 5 可以看到, 用中等分辨率(0.1 nm) 的光谱仪测量时, 尽管谱带的 $^{P}P$ 支

与<sup>P</sup>Q支、<sup>R</sup>Q支与<sup>R</sup> 支重叠较严重,但仍能看到清晰的转动 结构。

在转动结构中, 高态 J 与低态 J 之间的转动谱线强度 为<sup>[17]</sup>

$$I_{J}^{J} = CS_{J}^{J} \exp\left(-\frac{F(J)hc}{kT_{\rm r}}\right)$$
(2)

其中,

 $F(J) = B_{v}J(J + 1) - D_{v}J^{2}(J + 1)^{2} + L$ 

式中, $I'_{f}$ 为谱线强度,C是常数, $S'_{f}$ 是 Hölm-London 系数, F(J)为转动项值, $B_{\vee}$ 和  $D_{\vee}$ 是转动常数,h为普朗克常数,c为光速,k为玻尔兹曼常数, $T_{r}$ 为转动温度。在介质阻挡放 电条件下,转动温度近似等于气体温度<sup>[7]</sup>。

为了测量气体温度,我们用自编的氧气 A 带光谱拟合程 序拟合了不同转动温度下的氧气 A 带(0,0)的光谱,拟合时 所用的光谱项常数取自文献[17,18]。图 5 对实验测得的光 谱与程序拟合光谱进行了比较,可以看出,在转动温度为 650 K时实测光谱与拟合谱线符合很好,但在 768 nm 以后 实测光谱比拟合光谱强度略高,这是因为实测光谱中含有氧 气 A 带(1,1)振动带,而拟合时只考虑了(0,0)带。因此, 本实验条件下等离子体中气体温度约为(650 ±20) K。



Fig. 5 Comparison between observed and synthesized spectra of oxygen A band for Tr = 650 K 1: experamental; 2: synthesized

## 2.3 氧气 A 带的产生机理分析

氧气的激发态 $(a^{-1}_{g}, b^{-1}_{g}, c^{-1}_{u}, A^{-3}_{g}$  和  $A^{-3}_{u}$ 等)具有相似的特点: (1) 解离能都比较低(小于 5.1 eV),在 等离子体区域容易解离成氧原子; (2) 激发态之间的跃迁和 激发态向基态的跃迁都是电偶极矩禁戒的,辐射跃迁概率比 较小,辐射寿命较长; (3) 容易被 O, O<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 等粒子猝灭。 图 6 给出了氧气常见激发态的势能曲线,图中标出了氧气 A 带的跃迁。除 A 带外,氧气可能的跃迁还有  $a^{-1}_{g} - X^{-3}_{g}$ 和  $A^{-3}_{u} - X^{-3}_{g}$ ,下面通过三个常见激发态的产生、跃迁和猝 灭过程,结合文献中的动力学常数(均换算为  $T_{e} = 1.02 \text{ eV}$ 的值),来分析氧气 A 带的产生机理。

#### 2.3.1 激发态的产生途径

在等离子体中氧气的激发态主要由以下途径生成<sup>[19]</sup>:

电子直接激发:在我们的实验条件下,虽然电子平均温度(能量)约为1 eV,但根据能量分布函数也存在能量较高的电子,所以有些电子可以与基态或低激发态氧分子发生碰撞



electronic states of oxygen

激发即

$e + O_2(X^3_g) \leftarrow e + O_2(a^1, 0.9772 eV)$	
$k_1 = 3.7 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1[20]}$	RI
$e + O_2(X^3 \dot{g}) \leftarrow e + O_2(b^1 \dot{g}, 1.6266 eV)$	DЭ
$k_2 = 3.68 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/21/3}$	K2
$e + O_2(X^3 \dot{g}) \leftarrow e + O_2(A^1 \dot{u}, 4.4278 eV)$	R3
$k_3 = 2.37 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/21/3}$	K5
$e + O_2(a^{-1}), 0.9772 eV) \leftarrow e + O_2(b^{-1})_g^+, 1.6266 eV)$	R4
$k_4 = 1.55 \times 10^{-15} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/3}$	1(7
$e + O_2(a^1, 0.9772 eV) \leftarrow e + O_2(A^3, u^+, 4.4278 eV)$	R5
$k_5 = 3.75 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/21/3}$	IC.
$e + O_2(b^{1}_{g}, 1.6266 eV) \leftarrow e + O_2(A^{3}_{u}, 4.4278 eV)$	
$k_6 = 1.17 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/21}$	R6
上述反应中速度常数最大的是 R4,所以 b¹ +g的生	E成

## 量最多。

氧原子引起的激发:氧气的基态( $X^{3}$ )和常见低激发 态( $a^{1}$ , $b^{1}$ , $c^{1}$ , $a^{3}$ , $A^{3}$ , $a^{3}$ ;等)的解离能都比 较低(小于 5.1 eV),在等离子体区域容易解离成氧原子。这 些氧原子一部分继续激发为高激发态原子,一部分可以激发 氧分子,或者与臭氧作用

 $O({}^{1}D) + O_{2}(X^{3} g) O({}^{3}P) + O_{2}(a^{1} g)$  $k_{7} = 1.0 \times 10^{-18} m^{3} \cdot s^{-1/21/3}$ R7

$$O({}^{1}D) + O_{2}(X^{3} \cdot g) = O({}^{3}P) + O_{2}(b^{1} \cdot g^{+})$$

$$k_{8} = 7, 0 \times 10^{-17} \text{ m}^{3} \cdot \text{s}^{-1/20/3}$$
R8

$$O(^{1}D) + O_{3}(X^{1}A_{1}) O(X^{3}_{g}) + O_{2}(a^{1}_{g})$$

$$k_{0} = 1.5 \times 10^{-17} \text{ m}^{3} \cdot \text{s}^{-1/20/3}$$
R9

$$O({}^{1}D) + O_{3}(X {}^{1}A_{1}) = O(X {}^{3} {}_{g}) + O_{2}(b {}^{1} {}_{g}^{+})$$
  

$$h = 7.7 \times 10^{18} m = c^{-1/20/3}$$
R10

 $O({}^{3}P) + O_{3}(X {}^{1}A_{1}) = O_{2}(X {}^{3} {}_{g}) + O_{2}(b {}^{1} {}_{g})$ 

$$k_{11} = 1.4 \times 10^{-21} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/}$$

$$O({}^{3}P) + O_{3}(X {}^{1}A_{1}) \qquad O_{2}(X {}^{3}{}_{g}) + O_{2}(a {}^{1}{}_{g})$$
  

$$k_{12} = 2.8 \times 10^{-21} \text{ m}^{3} \cdot \text{s}^{-1/20/}$$
R12

#### 上述反应中速度常数最大的是 R8, 也有利于 $b^{\perp}$ ; 的

## 生成。

- 2.3.2 激发态的猝灭过程
- 如前所述,氧气的激发态都容易被 $O, O_2$ 和 $O_3$ 等粒子 猝灭。

#### 氧原子引起的猝灭为

$O(^{3} P) + O_{2}(a^{1} g)$	$O({}^{3}P) + O_{2}(X^{3} \dot{g})$	D12
$k_{13} = 1.3 \times 10^{-22} \text{ m}^3$ .	s <sup>-1</sup> [20]	К13
$O({}^{3}P) + O_{2}(b^{1}{}^{+}{}^{+}_{g})$	$O(^{3} P) + O_{2}(X^{3} \dot{g})$	D14
$k_{14} = 4.0 \times 10^{-20} \text{ m}^3$ ·	s <sup>-1</sup> [20]	K14
$O({}^{3}P) + O_{2}(A^{1} {}^{+}u)$	$O_2(X^3 = P) + O(^3 P)$	

- R15  $k_{15} = 4.95 \times 10^{-18} \text{ m}^{3} \cdot \text{s}^{-1/22/}$   $O(^{3} P) + O_{2}(b^{1} \text{ g}) = O(^{3} P) + O_{2}(a^{1} \text{ g})$  R15 R15
- $k_{16} = 8.1 \times 10^{-20} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/23/}$   $O(^3 P) + O_2(A^3 \text{ u}^+) O_2(b^1 \text{ g}^+) + O(^3 P)$   $k_{17} = 9.0 \times 10^{-19} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/}$ R17

$$O({}^{3}P) + O_{2}(A {}^{3} {}^{u}) O_{2}(A {}^{1} {}^{g}) + O({}^{3}P)$$

$$k_{18} = 1.0 \times 10^{-19} \text{ m}^{3} \cdot \text{s}^{-1/20/3}$$
R18

氧原子对  $A^{3}$  <sup>+</sup> 的猝灭 (R15, R17, R18) 速度比对  $a^{1}$  <sub>g</sub>和  $b^{1}$  <sup>+</sup> 的大1~4个数量级, 而  $A^{3}$  <sup>+</sup> 猝灭时还能生成  $a^{1}$  <sub>g</sub>和  $b^{1}$  <sup>+</sup> <sub>g</sub>。

## 氧分子引起的猝灭为

$O_2(X^3 \dot{g}) + O_2(a^1 g) = 2O_2(X^3 \dot{g})$	<b>D</b> 10
$k_{19} = 2.2 \times 10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/3}$	K19
$O_2(a^1_g) + O_2(a^1_g) = O_2(X^3_g) + O_2(b^1_g)$	R20
$k_{20} = 1.9 \times 10^{-23} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/24/3}$	1120
$O_2(X^3 g) + O_2(b^1 g) 2O_2(X^3 g)$	R21
$k_{21} = 8.0 \times 10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/3}$	
$O_2(X^3 \dot{g}) + O_2(b^1 \dot{g}) O_2(X^3 \dot{g}) + O_2(a^1 g)$	R22
$k_{22} = 3.2 \times 10^{-23} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/22/2}$	
$O_2(X^3, g) + O_2(A^3, u) = O_2(a^1, g) + O_2(X^3, g)$	R23
$k_{23} = 1.0 \times 10^{-19} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/3}$	
$O_2(X^3,g) + O_2(A^1,g) = O_2(b^1,g) + O_2(a^3,g)$	R24
$k_{24} = 9.0 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/207}$	
$O_2(X = g) + O_2(A = u) = 2O_2(b = g)$	R25
$k_{25} = 2.9 \times 10^{-5} \text{ m}^{-5} \text{ s}^{-1.03}$	<b>Tn</b> .

氧分子对  $A^{3}$  ; 的猝灭 (R23 ~ R25) 速度比对  $a^{1}$  ; 和  $b^{1}$  ; 的大 4 个数量级, 同样  $A^{3}$  ; 猝灭时还能生成  $a^{1}$  ; 和  $b^{1}$  ; ,其中生成  $b^{1}$  ; 的速度更快。

臭氧引起的猝灭:在氧气介质阻挡放电中很容易生成臭 氧<sup>[5]</sup>,臭氧能够引起氧气激发态的猝灭

$$\begin{array}{l} O_{3}\left(X^{1}A_{1}\right) + O_{2}\left(a^{1} g\right) & 2O_{2}\left(X^{3} g\right) + O\left(^{3}P\right) \\ k_{26} &= 3.8 \times 10^{-21} \text{ m}^{3} \cdot \text{s}^{-1/20/2} \\ O_{26}\left(X^{1}A_{2}\right) + O_{26}\left(b^{1} g^{1}\right) & 2O_{26}\left(X^{3} g^{2}\right) + O\left(^{3}P\right) \end{array}$$
R26

$$k_{27} = 1.54 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/}$$

$$O_{3}(X^{1}A_{1}) + O_{2}(b^{1} \frac{b}{g})$$

$$O_{2}(X^{3} \frac{b}{g}) + O_{2}(a^{1} \frac{b}{g}) + O(^{3}P)$$
R28

 $k_{28} = 7.0 \times 10^{-18} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1/20/3}$ 

2.3.3 激发态的跃迁过程

## 氧气的三个常见激发态都可能向基态发生跃迁

 $O_{2}(a^{1}) O_{2}(X^{3} \dot{g}) + h$   $k_{20} = 3.70 \times 10^{-4} s^{-1/26/}$ R29

其最强谱带 
$$O_2(a^{1}, c, c^{2}) = 0$$
  $O_2(X^{3}, c^{2}, c^{2})$  出现

在 1 268 nm,在红外区。  

$$O_2(b^1 g) O_2(X^3 g) + h$$
  
 $k_{30} = 9.09 \times 10^{-2} s^{-1/26/}$  R30

这就是氧气的 A 带。

$$O_2(A^{3} \stackrel{.}{_{u}}) O_2(X^{3} \stackrel{.}{_{g}}) + h$$
  

$$k_{31} = 6.25 \text{ s}^{\cdot 1/27/3} R31$$

最强谱带 
$$O_2(A^3 \ddagger, = 0)$$
  $O_2(X^3 \ddagger, = 7, 8, 9)$  出  
现在 252~246 nm 处。

综上所述, $A^{3}$  , 态势能较高,是生成速度最小而猝灭 速度最快(尤其在高气压下)的态,在等离子体区域浓度很 低,虽然辐射跃迁概率最大,但辐射强度较低; $a^{1}$  , 是寿命 最长(4 000 s)的亚稳态,向基态的跃迁速率很小,同样难以 观测到其发射光谱;而 $b^{1}$  , 的生成途径很多,且猝灭速率 较小,辐射跃迁概率比 $a^{1}$  , 大数百倍,因此相对来说较易 观测。本实验中观测到了清晰的  $O_{2}(b^{1}$  , O<sub>2</sub>( $X^{3}$  , ))跃 迁谱线,为研究氧气常压介质阻挡放电的物理化学过程提供 了方便。

## 3 结 论

(1)首次测量并分析了常压介质阻挡放电产生的氧气大 气谱带(0,0)的转动结构;

(2) 求得氧气常压介质阻挡放电时电子温度为(11 800 ±400) K,通过比较实测光谱与拟合光谱,测得气体温度为(650 ±20) K;

(3) 通过分析氧气常见激发态的产生方式、跃迁概率和 猝灭途径,结合已有的动力学数据,探讨了氧气大气谱带  $O_2(b^{1-\frac{1}{2}}, = 0) O_2(X^{3-\frac{1}{2}}, = 0)$ 的产生机理。

#### 参考文献

- [1] Kogelschatz U. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1.
- [2] Choi J H, Lee E S, Baik H K, et al. Plasma Sources Science and Technology, 2005, 14(2): 363.
- [3] Alexandrov S E, Hitchman M L. Chemical Vapor Deposition, 2005, 11(11-12): 457.
- [4] Borcia G, Anderson C A, Brown N M D. Plasma Sources Science and Technology, 2005, 14(2): 259.
- [5] Wagner H E, Brandenburg R, Kozlov K V, et al. Vacuum, 2003, 71(3 Spec.): 417.
- [6] Bogaerts A, Neyts E, Gijbels R, et al. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2002, 57(4): 609.

- [7] Xi-Ming Z, Yi-Kang P. Physics of Plasmas, 2005, 12(10): 103501.
- [8] WANG Weirguo, XU Yong, LIU Zhong wei, et al (王卫国,徐勇,刘忠伟,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(9): 1589.
- [9] Boudam M K, Saoudi B, Moisan M, et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(6): 1694.
- [10] REN Qingelei, LIN Qi(任庆磊,林 麒). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(11): 2116.
- [11] Bucholtz A, Skinner W R, Abreu V J, et al. Planetary and Space Science, 1986, 34(11): 1031.
- [12] Witt G, Stegman J, Solheim B H, et al. Planetary and Space Science, 1979, 27(4): 341.
- [13] Stam D M, De Haan J F, Hovenier J W, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2000, 64(2): 131.
- [14] Kokhanovsky A A, Mayer B, Rozanov V V, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 103(3): 460.
- [15] George A H, Helen S H. The Journal of Chemical Physics, 1949, 17(10): 982.
- [16] Herman R C, Hopfield H S, Hornbeck G A, et al. The Journal of Chemical Physics, 1949, 17(2): 220.
- [17] Touzeau M, Vialle M, Zellagui A, et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, 24(1):41.
- [18] Herzberg G, Spinks J W T. Molecular Spectra and Moleoular Structure, Vol. : Spectra of Diatomic Molecules. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1950. 107.
- [19] Slanger T G, Copeland R A. Chemical Reviews, 2003, 103(12): 4731.
- [20] Ionin A A, Kochetov I V, Napartovich A P, et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(2): R25.
- [21] Gudmundsson J T, Thorsteinsson E G. Plasma Sources Science and Technology, 2007, 16(2): 399.
- [22] Vasiljeva A N, Klopovskiy K S, Kovalev A S, et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(17): 2455.
- [23] Gordiets B F, Ferreira C M, Guerra V L, et al. IEEE Transactions on Plasma Science, 1995, 23(4): 750.
- [24] Heidner III R F, Gardner C E, El-Sayed T M, et al. The Journal of Chemical Physics, 1981, 74(10): 5618.
- [25] Kenner R D, Ogryzlo E A. Can. J. Chem., 1983, 61: 921.
- [26] Schofield K. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1979, 8(3): 723.
- [27] Kenner R D, Ogryzlo E A. Chemical Physics Letters, 1983, 103(3): 209.

# Analysis of Oxygen Atmospheric Band in Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure

XIE Wei-jie<sup>1,2</sup>, LI Long-hai<sup>1,3</sup>, JIAN GJ u-hui<sup>1</sup>, CAI Wei-min<sup>1</sup>

- 1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
- 2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China
- 3. School of Environmental Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

**Abstract** The emission spectra of pure oxygen in dielectric barrier discharge at atmospheric pressure were observed. Comparison between experimental and fitting spectra of oxygen A band  $(b^1 \frac{1}{g} - X^3 \frac{1}{g})(0, 0)$  was used to determine the gas temperature, and the electronic temperature was calculated from O lines. The causation of oxygen A band in atmospheric dielectric barrier discharge was discussed by means of analysis of producing and quenching approaches. The result showed that the electronic temperature, (11 800 ±400) K, was much higher than the gas temperature, (650 ±20) K. The emission from  $a^1$  g or  $A^3$   $u^+$  was not been observed, but atmospheric band with its resoluble rotational structure was measured.

Keywords Dielectric barrier discharge; Oxygen; Emission spectroscopy; Electronic temperature; Rotational temperature

(Received Dec. 6, 2007; accepted Mar. 19, 2008)