

# 绝缘阻挡放电等离子体发光光谱的特性\*

李汉明<sup>1,2)</sup> 李 钢<sup>3)</sup> 李英骏<sup>1,2)†</sup> 李玉同<sup>2)</sup> 张 翼<sup>2)</sup> 程 涛<sup>1,2)</sup> 聂超群<sup>3)</sup> 张 杰<sup>2,4)</sup>

1) 中国矿业大学(北京)理学院, 北京 100083)

2) 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

3) 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

4) 上海交通大学物理系, 上海 200240)

(2007 年 5 月 13 日收到, 2007 年 6 月 1 日收到修改稿)

为了对绝缘阻挡放电(DBD)等离子体进行参数优化,以常压 DBD 等离子体为研究对象,在常温常压下使用可见光光栅光谱仪对等离子体发光光谱进行了诊断,得到了  $N_2$  和  $O_2$  的第二正带跃迁谱线. 通过对等离子体光谱的分析发现,等离子体发射光谱强度随着电压升高而增大,并且在 39—41 kHz 的范围内可以获得稳定的等离子体发光. 与此同时,Helium 气体的引入,可以在很大程度上增加等离子体的发光强度. 与理论分析结合,证实了光谱测量方法在 DBD 等离子体研究上的可行性.

关键词: 绝缘阻挡放电, 光谱, 荧光, 光谱仪

PACC: 5235, 4700, 5225, 5200

## 1. 引 言

目前在流体力学研究领域,流动控制是一个重要的研究方向. 人们已经探索了几种改变和控制流场的方法<sup>[1]</sup>,主要分为被动和主动控制. 文献中公开的被动控制方法有表面处理、表面震动等<sup>[2,3]</sup>,这些方法不需要输入外部能量. 而主动控制的方法包括:声激励、连续或间断的吸吹等. 主动控制需要输入外部能量,有便于控制的优点,可以根据需要而打开或关闭. 利用绝缘阻挡放电(DBD)等离子体进行流动主动控制以抑制流动分离、减小飞行器的气动阻力是近年来国外掀起的又一新概念.

Malik 等<sup>[4]</sup>首先利用电晕放电等离子体控制平板边界层,发现当来流速度为 30 m/s、激励电压为 15 kV 时,阻力可以减小 20%. El-Khabiry 和 Colver<sup>[5]</sup>通过数值计算研究了低雷诺数平板流动时电晕放电等离子体引起的阻力减小的现象. Balcer<sup>[6]</sup>开展了在有逆压梯度的平板上的等离子体的实验研究,发现当施加激励时近壁附近的空气速度增大,但是倾斜的电极并未在边界层内引发大的空气纵向涡. 在 Huang 等<sup>[7]</sup>的实验中,雷诺数  $Re < 2.5 \times 10^4$  时流动

分离无法自动复合,而在等离子体作用下低雷诺数时也可使流动复合并且可使复合点提前. Daniel 等<sup>[8]</sup>通过实验表明,在等离子体的作用下,泄露涡的最大值略有下降,对通道涡的影响不大;马蹄涡的尺度减小但强度增大,泄露涡的最大压力损失系数降低了 29.5%. 总之,当  $Re = 1 \times 10^6$  时,等离子体激励器对泄漏流有显著的影响. Thomas 等<sup>[9]</sup>开展了将等离子体用于飞机起落架减噪的工作,他们在圆柱体上沿周向布置了多个等离子体激励器,施加稳态激励后发现阻力和漩涡脱落都减少了,而且阻力的减小与雷诺数成反比. Mehul 等<sup>[10]</sup>开展了在无人驾驶飞行器的机翼上布置等离子体激励器的风洞实验,结果表明,等离子体激励器通过利用机翼前缘涡和尾缘涡,能在很大的攻角范围内显著改变飞行器的受力.

DBD 等离子体对周围气体的流动有加速的作用,这点是经过实验证实的. 但从目前的研究情况来看,DBD 产生的等离子体只能对低速流动进行有效的控制,无法使由于较大逆压梯度引起的流动分离复合. 这主要由于 DBD 在静止空气中诱导出的流速还很低,只有 10 m/s 左右. 因此如何提高 DBD 诱导出的速度,使其真正具有实用价值,是值得研究

\* 国家自然科学基金(批准号:10474137,60621063,10510490,10575129,10675164)和国防基础科技项目(批准号:AA20070090)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn

的重要课题. 2004 年 Enloe 等<sup>[11,12]</sup>通过对推力、电压以及等离子体特性的大量测试和模拟研究了等离子体诱导的气体速度与输入功率、等离子体诱导流动的方向与电极的布置方式的关系等. 结果表明, 等离子体在空间和时间上是高度结构化的, 而且在正弦波形电压的激励下, 等离子体的发光强度在两个半周期内不规则. 目前国内外采用的其他先进的研究方法包括光电倍增管测等离子体的发光强度<sup>[13]</sup>、激光测等离子体周围的空气密度<sup>[14]</sup>、声学测量等.

由于 DBD 是在绝缘材料表面小范围内产生低密度等离子体, 直接测量等离子体密度有很大难度. 与此同时, 等离子体中大量的带电粒子处于复杂的运动状态, 因而可能辐射出多种形式的电磁波, 波长范围相当广泛: 从微波开始, 有红外线、可见光、紫外光直到 X 射线. 这些辐射过程和等离子体内部状态密切相关. 对等离子体发射光谱的测量研究可以获得等离子体温度、密度以及离子成分等重要参数, 加之无接触测量的优势, 对等离子体没有干扰, 因而光谱测量成为等离子体的一种重要的诊断手段<sup>[15-17]</sup>, 在低温等离子体实验技术<sup>[18,19]</sup>中具有重要的作用.

为了对 DBD 的机理有深入的认识, 进而找到提高诱导流速方法, 从而使其可对高速流动进行控制, 本文利用测定等离子体发光光谱的方法, 进行了 DBD 等离子体的发光机理研究, 并对激励等离子体的电压参数进行了优化.

## 2. 实验布局

实验是在中国科学院物理研究所的光物理实验室进行的, 实验中利用了一台 ACTON RESEARCH 公司的可见光谱仪(型号为 INS-150-252F)测量等离子体发光谱线, 该谱仪的测量范围为 200—1200 nm, 且中心波长可调, 谱仪狭缝宽度为 0.5 mm.

整个实验在大气中进行, 具体的 DBD 等离子体生成装置如图 1 所示. 产生 DBD 等离子体的电极排布方式为非悬空交错电极, 电极参数为 12.5 mm × 6.0 cm, 电极间距为 1 mm. 绝缘材料为有机玻璃, 厚度为 1 mm, 加工成类似机翼的弯曲形状. 通过高压高频电源发生器对电极施加可变幅变频的高压高频电压. 其中电压通过高压探头加在电极上, 另一个电极接地. 通过电压衰减器将施加的高压高频电压与示波器相连, 以便实时测量电压的幅值和频率. 在电极 1 的附近生成等离子体, 等离子体发光通过

收集透镜收集到光谱仪里面, 利用光谱仪对等离子体荧光成分进行分析. 具体的实验装置如图 2 所示.

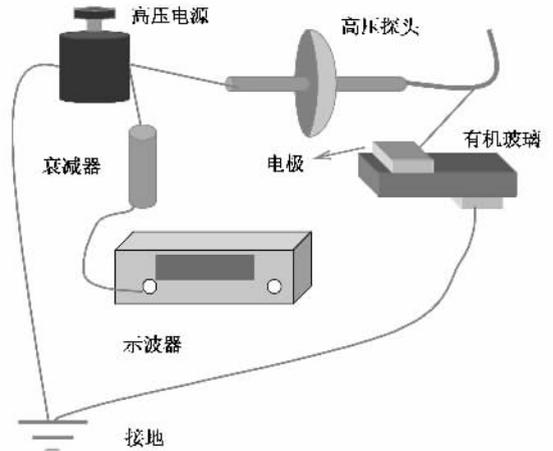


图 1 DBD 等离子体生成装置示意图

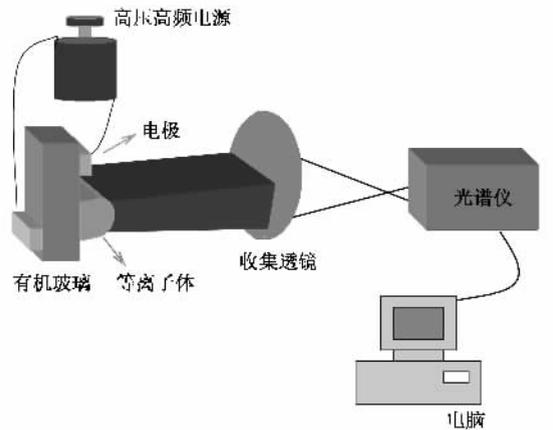


图 2 光谱仪测量等离子体荧光光谱成分实验布局图

## 3. 实验结果和讨论

实验中, 首先通过改变光谱仪的中心波长, 得到了在电极上施加高压高频电压后获得的等离子体荧光总的谱线图. 其中激励电压幅值取为 7500 V, 电压频率取为 33.3 kHz, 经过标定后的光谱仪测得的发射光谱结果如图 3 所示. 通过图 3 可以看出, 谱线主要集中在 300—400 nm 以及 600—800 nm 范围内, 对比发现, 300—400 nm 的谱线强度比 600—800 nm 强得多. 所以在后面的实验讨论中, 所主要关注的波长范围为 300—400 nm, 光谱仪的中心波长取为 350 nm, 其中最强的谱线为 339.1 nm 氧二系谱线(OII 线).

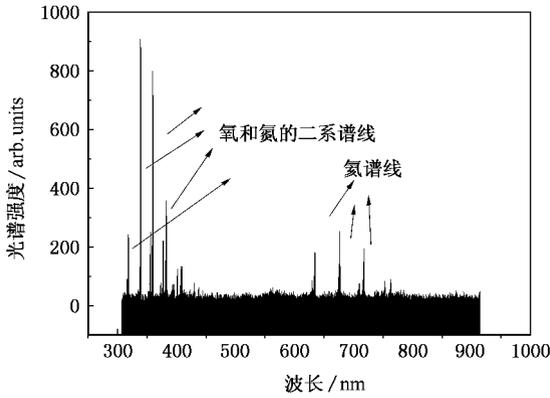


图3 电压幅值为 7500 V,电压频率为 33.3 kHz 时,光谱仪得到的等离子体荧光总谱图

为了得到激励电压幅值对发射谱强度的影响,把最强的 339.1 nm OII 谱线强度等价于等离子体发光强度,电压频率取为 33.3 kHz. 电压幅值从 7500 V 增加到 10500 V 的过程中,谱线强度从 1000 增加到 3250 结果如图 4 所示. 从图中可以推断,等离子体发射光谱强度随着电压升高而增大.

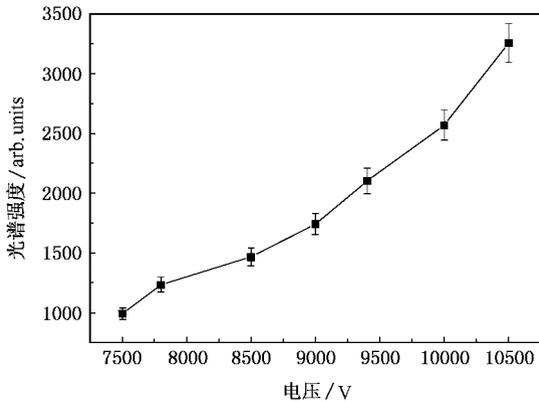


图4 最强发射谱线(O 谱 339 nm)强度随着电压幅值的变化关系,其中电压频率为 33.3 kHz

为了得到激励电压频率对发射谱强度的影响,实验中电压幅值取为 7500 V. 电压频率从 30 kHz 增加到 45 kHz 的过程中,谱线强度起伏不定,但平均谱线强度始终增大,如图 5 所示. 从图 5 可以推断,等离子体发射谱线强度随着频率增加而增大,但在 39—41 kHz 的范围内可以获得稳定的等离子体发光.

为了得到气体组分对等离子体光谱的影响,我们在相互作用区充入 Helium 气体,对比充入 Helium 前后的光谱. 图 6 为 7500 V, 33 kHz 电压条件下得到的 300—400 nm 的等离子体光谱图,图 7 为 7500 V,

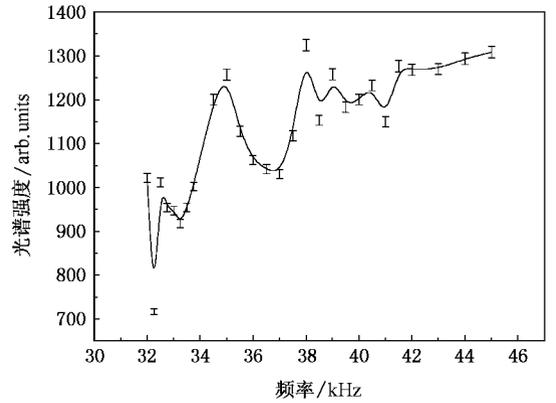


图5 最强发射谱线(OII 谱)强度随着频率的变化关系,其中电压幅值取为 7500 V

33 kHz 电压条件下得到的 300—400 nm 的充氦等离子体光谱. 对比发现充入氦气后等离子体发光谱中最强谱线强度增加了 400 倍,光谱的整体强度获得了显著的增强.

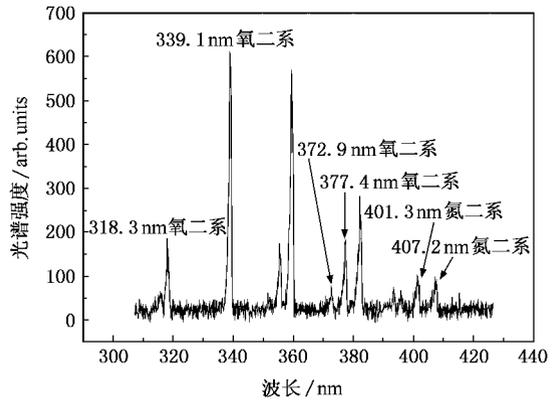


图6 7500 V, 33 kHz 电压条件下得到的 300—400 nm 的等离子体光谱图

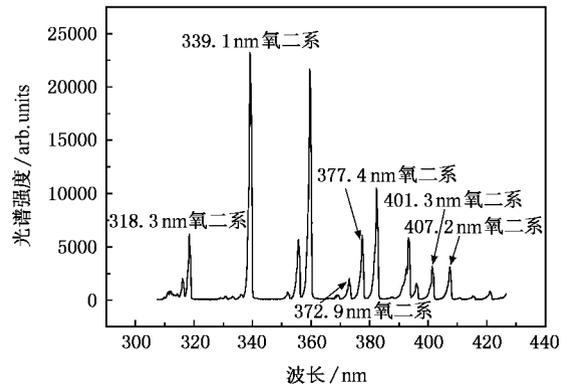


图7 7500 V, 33 kHz 电压条件下得到的 300—400 nm 的充氦等离子体光谱图

DBD 等离子体是将绝缘介质插入放电空间的一种气体放电. 介质可以覆盖在电极上,也可以悬挂在放电空间里. 当在放电电极间施加一定频率的足够高的交流电压时,电极间的气体就会被击穿,产生介质阻挡气体放电. 放电产生大量的离子和电子,在电场的作用下,电子和离子从电场中获取能量,通过与周围的空气分子和原子碰撞的方式把能量转移给它们,使之激发电离,产生电子雪崩. 雪崩中的高能电子通过导电通道时,一些激发态原子和分子会辐射光谱. 其中 300—400 nm 之间的谱线主要为氧和氮的发射谱,600—800 nm 之间主要为 Helium 谱. 由于空气中的氧气和氮气占了绝大部分,电子与氧气和氮气分子碰撞的概率远远大于氩,这就带来了发光光谱强度的差别. 这与实验中测得的全谱中谱线强度的对比结果相一致.

原子物理模拟程序 FLY<sup>[20]</sup>包含了从氦到铁之间各个元素的离子能级信息. 在使用者输入原子序数以及所关心的电子温度和密度等信息后,FLY 可以在考虑了碰撞电离和复合、自发复合、受激复合、光电离、光激发、碰撞激发等过程的前提下,计算出稳态近似、非局域热动平衡或者局域热动平衡下,各个离子能级和精细能级上的粒子数. 此后可以计算出跃迁强度、谱线线形,获得等离子体发射谱线. 我们利用 FLY 程序对稳态近似条件下 DBD 等离子体的发光谱线进行了理论计算,计算结果和实验得到的谱线的对比见图 8. 在理论计算中,我们认为空气是由氮气和氧气组成的,因此程序中仅考虑了氧和氮的离子能级以及精细能级上的粒子数,而对于空气中的其他成分被电离后的离子能级没有考虑,所以在实验上得到了一些理论计算中没有出现的谱线. 但我们主要关心的氧和氮离子的第二正带跃迁

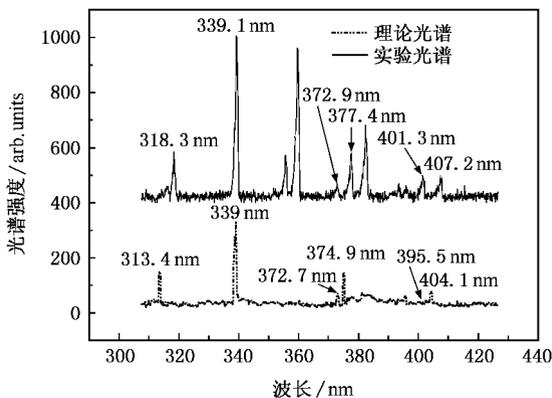


图 8 程序计算和实验得到的等离子体发光光谱对比

谱线在实验和理论上均可以得到,两者基本符合. 其中细微差别产生原因可以归结为常温常压下空气中非平衡等离子体中离子的迁移率小,在电场中来不及加速,在模拟中视为不动的原因. 而在实际的等离子体产生光谱的实验过程中,电子和离子在电场中均得到加速,虽然离子被加速到的速度相对于电子来说很小,但仍然会对光谱的位置产生一些影响. 理论计算和实验结果中具体对应的第二正带跃迁谱线对比见表 1.

表 1 实验和理论计算中氧气和氮气分子的第二正系跃迁发射谱线的对比

	理论结果/nm	实验结果/nm
	313.4	318.3
OII	339.0	339.1
$2s^2 2p^2 3p \rightarrow 2s^2 2p^2 4s$	372.7	372.9
	374.9	377.4
NII	395.5	401.3
$2s^2 2p 3s \rightarrow 2s^2 2p 3p$	404.1	407.2

在等离子体的产生过程中,电极之间的空气被击穿,形成大量的电子和离子,电子和空气中的氧气和氮气分子碰撞,激发电离分子形成离子. 处于激发态的离子在向低能级跃迁的过程中辐射光子,获得窄带特征可见光谱. 当施加在电极极板之间的电压增强时,分子被电离到激发态的概率增加,从而造成了激发态离子数的增加,进而增加了辐射光子的数目. 光子数目的增加带来了光谱强度的增加. 与此同时,电离空气获得的电子数目越多,等离子体密度越高. 从而我们可以得到一个结论:等离子体发射光谱强度越强,等离子体密度越大.

绝缘阻挡放电的功率也是一个重要的参数,由于绝缘阻挡放电的电流、电压的相位严重失调,它的功率计算和测量相当困难. 目前只能宏观测定,在电压-电荷李萨如图形的帮助下,可以正确的确定放电功率. 在一个周期内的放电能量可以表示为

$$W_n = \int_{t=0}^{t=T} u(t) i(t) dt = \int_{Q(t=0)}^{Q(t=T)} u(t) dQ, \quad (1)$$

其中  $dQ(t) = i(t) dt$ .

(1) 式的积分结果代表在一个周期内电压-电荷李萨如图所围的面积. 所以放电功率比可以表示为

$$P = W_n f, \quad (2)$$

其中  $f$  为输入电压频率,通过放电功率可以发现,在保证放电能量不变的前提下,放电功率和工作电压频率成正比,同时放电功率的大小决定了等离子体发光强度的大小,也就是说,等离子体发光强度与频率成正比,这与实验结果基本吻合。

Helium 作为一种稀有气体,正常情况下氦原子中 2 个电子都处于  $1s$  态,形成  $1s1s$  的组态。电子激发中较为常见的一个电子始终留在  $1s$  态,只是另一个被激发到不同的能级。因为有 2 个电子,所以形成的原子态有 2 组,一组为单态( $s=0$ ),一组为三重态( $s=1$ )。通过对总谱中 3 条氦的谱线的分析发现,氦原子中 2 个电子形成的原子态为三重态,也就是氦的种类为正氦。对于正氦而言,其电离阈值为  $4.0\text{ eV}$ ,而  $O_2$  和  $N_2$  的电离阈值分别为  $5.08\text{ eV}$  和  $7.37\text{ eV}$ 。通过比较可以发现:实验中用来作为催化剂的正氦更加容易被电离。充入 Helium 气体之后,氦原子周围的电子在电场中被电离,增加了相互作用区的电子数目。对于高温高密等离子体而言,能量吸收机理不仅仅是碰撞吸收,还包括一些非碰撞的吸收机理,例如共振吸收<sup>[21]</sup>、真空加热<sup>[22]</sup>、反常趋附效应<sup>[23,24]</sup>、 $J \times B$  加热<sup>[25]</sup>等。而 DBD 等离子体形成过程的时间尺度为  $\mu\text{s}$  量级,电子和分子之间相互

作用的流体效应明显,它们之间的能量交换机理主要是逆韧致吸收<sup>[26]</sup>,分子通过和电子碰撞获取能量。充入氦气之后带来的电子数目的增加从另外一个侧面增加了电子与气体分子碰撞形成离子的概率,可以在更大程度上增加辐射的光子数目,进而增加辐射的光强度,获得更大的等离子体密度。

## 4. 结 论

利用可见光光栅谱仪,测量了 DBD 等离子体的  $O_2$  和  $N_2$  的第二正带跃迁光谱,谱线的位置与原子数据计算的结果基本吻合。通过对实验测得的谱线强度的分析,对激励等离子体的电压参数进行了优化。实验结果表明,等离子体发光强度随着电压升高而增强,并且在  $39\text{--}41\text{ kHz}$  的范围内可以获得较为平坦的等离子体发光。与此同时,Helium 气体的引入,可以在很大程度上增加等离子体发光强度。理论分析结果表明,由于光谱仪收集角度固定,等离子体发光强度越强,等离子体密度越大。实验和理论结果证实了光谱测量方法在 DBD 等离子体研究上的可行性,这对于优化等离子体密度,进而获得 DBD 等离子体的实际应用有着重要的意义。

- [ 1 ] Gad-El-Hak M 2001 *Journal of Aircraft* **38** 402
- [ 2 ] Gad-El-Hak M 1990 *AIAA Journal* **28** 1537
- [ 4 ] Malik M, Weinstein L, Hussani M 2003 *AIAA Journal* **41** 231
- [ 5 ] El-Khabiry S, Colver G 1997 *Phys. Fluids* **9** 587
- [ 6 ] Balcer E B 2005 *M. S. ( Thesis Air Force Institute of Technology )* p113
- [ 7 ] Huang J H, Thomas C C, Flint O T 2006 *AIAA Journal* **44** 125
- [ 8 ] Daniel K Van N, Thomas C C, Scott C M 2006 *AIAA Journal* **44** 21
- [ 9 ] Thomas F O, Kozlov A, Corke T C 2005 *AIAA Journal* **44** 51
- [ 10 ] Mehul P P, Terry N T, Vasudevan S 2006 *AIAA Journal* **44** 671
- [ 11 ] Enloe C L, McLaughlin T E, VanDyken 2004 *AIAA Journal* **42** 589
- [ 12 ] Enloe C L, McLaughlin T E, VanDyken 2004 *AIAA Journal* **42** 595
- [ 13 ] Enloe C L, Thomas E M, Robert D V 2004 *AIAA Journal* **42** 844
- [ 14 ] Enloe C L, Thomas E M, Font G I 2005 *AIAA Journal* **43** 564
- [ 15 ] Ding C R, Wang B, Yang G W, Wang H Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1775 ( in Chinese ) [ 丁才蓉、王 冰、杨国伟、汪河洲 2007 物理学报 **56** 1775 ]
- [ 16 ] Zhang S D, Li H Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1297 ( in Chinese ) [ 张树东、李海洋 2003 物理学报 **52** 1297 ]
- [ 17 ] Zeng B Q, Wang R Y, Li X C 1997 *Chinese Science Bulletin* **42** 218
- [ 18 ] Tang X L, Qiu G, Wang L, Feng X P 2006 *The Journal of Light Scattering* **18** 156 ( in Chinese ) [ 唐晓亮、邱 高、王 良、冯贤平 2006 光散射学报 **18** 156 ]
- [ 19 ] Ge Z L, Ma N S 2004 *Transactions of China Electrotechnical Society* **19** 98 ( in Chinese ) [ 葛自良、马宁生 2004 电工技术学报 **19** 98 ]
- [ 20 ] Lee R W, Larsen J T 1996 *JQSRT* **56** 53
- [ 21 ] Forslund D W, Kindel J M, Lee K 1977 *Phys. Rev. Lett.* **39** 284
- [ 22 ] Brunel F 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 52
- [ 23 ] Rozmus W, Tikhonchuk V T 1990 *Phys. Rev. A* **42** 7401
- [ 24 ] Denavit J 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 3052
- [ 25 ] Krueer W L, Estabrook K 1985 *Phys. Fluids* **28** 430
- [ 26 ] Wilks S C, Krueer W L 1997 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **33** 1954

# The characteristics of the spectrum emitted from dielectric barrier-discharge plasmas<sup>\*</sup>

Li Han-Ming<sup>1)2)</sup> Li Gang<sup>3)</sup> Li Ying-Jun<sup>1)2)†</sup> Li Yu-Tong<sup>2)</sup> Zhang Yi<sup>2)</sup> Cheng Tao<sup>1)2)</sup>  
Nie Chao-Qun<sup>3)</sup> Zhang Jie<sup>2)3)</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Sciences, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*

<sup>2</sup> *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

<sup>3</sup> *Institute of Engineering and Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

<sup>4</sup> *Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*

( Received 13 May 2007 ; revised manuscript received 1 June 2007 )

## Abstract

In order to optimize the parameters of dielectric barrier-discharge plasmas, the emission spectrum of second transition line of oxygen and nitrogen under normal temperature and pressure was measured with a grating spectrometer. The results show that the intensity of the emission spectrum of the plasma increases with the voltage, and the best frequency range to generate the plasma spectrum is 39—41 kHz. Meanwhile, the introduction of helium gas increases the intensity to a high extent. In combination with the theoretical analysis, the feasibility of spectral method in the study of dielectric barrier discharge plasma is verified.

**Keywords** : dielectric barrier discharge, spectrum, fluorescence, grating spectrometer

**PACC** : 5235, 4700, 5225, 5200

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10474137, 60621063, 10510490, 10575129, 10675164 ) and the Basic Technology Program for the National Defense of China ( Grant No. AA20070090 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : lyj@aphy.iphy.ac.cn