

文章编号 : 1003-501X(2007)01-0041-05

常压放电低温等离子体辐射特性测量实验

林 麒, 任庆磊

(厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要 : 本文在自行设计的放电电极板上实现常压下的空气辉光放电 (APGD), 产生出一薄层的低温等离子体, 利用光栅单色仪及测试声强和温度的仪器对所产生的等离子体的光辐射、声辐射和热辐射特性进行实验测量。数据处理后的分析结果表明, 该 APGD 等离子体的光辐射强度及声辐射和热辐射强度, 以及总辐射能量基本上都与电极板的加载功率呈线性关系, 而且各种形式的能量各占比例是一定的。研究结果表明可以通过沿面 APGD 的辐射特性与加载功率之间的关系来描述 APGD 等离子体的特性, 以及控制等离子体的产生量。

关键词 : 辐射特性 ; 低温等离子体 ; 常压辉光放电

中图分类号 : O536

文献标识码 : A

Radiation characteristic measurement of low temperature plasma under atmospheric pressure

LIN Qi, REN Qing-lei

(*School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering,
Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

Abstract : A thin layer of the low temperature plasma due to Atmospheric Pressure Glow Discharge (APGD) in air was produced on the planar surface of designed electrode plates. The optical, acoustic and thermal radiation characteristics of the produced plasma were measured in experiment with a grating spectrograph system, a sound level meter and a non-contact thermometer, respectively. The analysis results from the data processed indicate that the intensity of the optical, acoustical and thermal radiation of the APGD plasma grow linearly up with the increasing power applied to the electrode plate, which demonstrates that the total radiance varies linearly with the power and that every kind of radiant energy has a proper proportion. The study shows that it is feasible to describe the behavior of the APGD plasma and to control it quantitatively by the obtained relationship between its radiation characteristic and applied power.

Key words : Radiation characteristic; Low temperature plasma; Atmospheric pressure glow discharge

引 言

目前等离子体的应用已成为一门新技术并得到推广, 因而受到国内外学者的关注并展开研究。在常压下产生的等离子体在诸多领域, 如材料表面改性、环境保护、航空等领域中都有非常重要的应用意义^[1-3], 常压下的空气辉光放电(即 APGD : Atmospheric Pressure Glow Discharge)生成低温等离子体作为一种典型的方式, 具有作用效果均匀稳定等优点, 成为研究的热点^[4,5]。

常压下的等离子体对作用对象(如材料表面、气流流动等)的影响程度与其特性有关, 特别是其强度。为了有效地利用和控制等离子体, 需要了解其特性, 对其参数进行测量, 以便更深刻地描述它。但是对于 APGD 产生的低温等离子体的测量诊断和特性描述向来是困扰人们定量应用它的难题。关于等离子体特性

收稿日期 : 2006-05-10 ; 收到修改稿日期 : 2006-10-08

基金项目 : 福建省自然科学基金(A0410001)

作者简介 : 林麒(1954-), 女(汉族), 广东揭阳人, 工学博士, 教授, 从事常压下低温等离子体研究。E-mail: qilin@xmu.edu.cn

参数的测量,就目前而言,对真空条件下产生的等离子体的诊断技术较为成熟,各种文献资料中介绍的也大多是真空条件下的探针诊断法。对于 APGD 等离子体参数的测试诊断,则难见有相关的文献,迄今一直缺少一种有效的诊断手段。真空下用得成功的 Langmuir 探针诊断法在 APGD 下并不适用,因为在大气压条件下,电子的平均自由程小于 Langmuir 探针周围鞘层的德拜长度,这就需要寻求其它途径。因此,APGD 的等离子体参数的诊断技术很值得人们去进行研究。

辐射现象,包括光辐射(电磁波辐射)、声辐射和热辐射等是等离子体特性的表现方式。常压下空气辉光放电产生的等离子体也同样具有这些辐射特性。虽然目前无法通过有效手段直接对 APGD 等离子体进行诊断,获取其电子温度和电子密度等特性参数,但对其辐射特性的测量可以从侧面定量地反映 APGD 等离子体的强度。本文据此设计了 APGD 等离子体光辐射、声辐射及热辐射的测量方案,并进行了实验测试,获取了有价值的实验数据,给出了 APGD 产生的低温等离子体辐射特性的分析。

1 APGD 等离子体辐射实验与测量

本文设计了常压下空气辉光放电(APGD)装置,并在电极板平面上产生了一薄层的低温等离子体。本文的 APGD 等离子体产生装置由放电电极板与高压电源组成。电极板的基板是电介质材料(玻璃纤维环氧树脂)厚 $H=1.0\text{mm}$ 电极分别布置在板两侧,板上所附电极为条状,板下方电极为片状,电极条厚 $h=0.1\text{mm}$,宽 $d=0.3\sim 0.5\text{mm}$,长 110mm ,各相距 $D=7\sim 10\text{mm}$,并连接成为一个电极;板下方电极是附着在基板上的,一层厚 $h=0.1\text{mm}$ 的铜板(见图 1)。

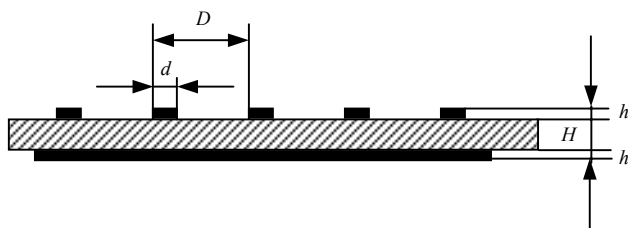


图 1 电极板结构示意图

Fig.1 Sketch of the APGD electrode plate

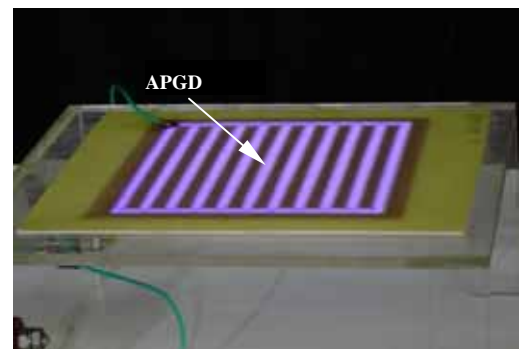


图 2 沿电极板平面 APGD 放电实验

Fig.2 APGD in air on the flat plan

APGD 实验过程中可明显地观察到等离子体的各种辐射现象。图 2 为一幅 APGD 实验照片。当对电极板两侧的电极加上高压交流电,一旦 APGD 启动,便会见到每一电极条两侧发生辉光放电发出的可见紫色光芒(图 2 箭头所指之处)。放电生成一片范围约 $110\text{mm}\times 110\text{mm}$ 的平面低温等离子体层。伴随着发光,电极板同时清晰地发出“嘶、嘶”的空气被电离的声响。APGD 放电终止后,用手触摸电极板可感觉到板的温度明显升高。这些实验现象表明,APGD 放电产生等离子体的过程同时存在光辐射、声辐射和热辐射。也就是说,APGD 等离子体产生过程伴随着各种能量的转换。显然,掌握这些能量的释放状况,就可以深入研究 APGD 等离子体的性质,更好地加以利用。

实验中发现,当改变外加给电极板的功率时,放电的紫色光芒的亮度及区域会随之变化;发出的声响也会变得更响或小声;电极板的温度也会不同。当所加功率足够大时,电极板甚至发烫甚至冒火发烟击穿。这些辐射现象的差异说明沿面 APGD 生成的等离子体强度随加载功率不同而变化。因此,本文选择对各种辐射特性进行测量的方法来研究 APGD 等离子体,并在进行测量实验时,选择了电极板正常工作的四个不同的加载功率,考察沿面 APGD 放电的辐射特性随功率 P 变化的规律。

根据 APGD 电极板放电的具体情况,本文设计了合理的光谱测量实验方案,采用 SP-750i 型光栅单色仪测量 APGD 等离子体的辐射光谱,有关的测量系统构成如图 3 所示。实验时考虑到 APGD 放电的非均匀

性，将电极板中央对准单色仪的入射狭缝，并使电极板朝垂直于电极条的方向移动，以使得中央电极条的放电区域全部都得到单色仪的扫描测量^[6]。实验中选择了几种电极条布局不同的电极板进行光谱测量，它们的具体参数见表1(其中 d 为电极条宽度， D 为电极条间距，含义与图1相同)。

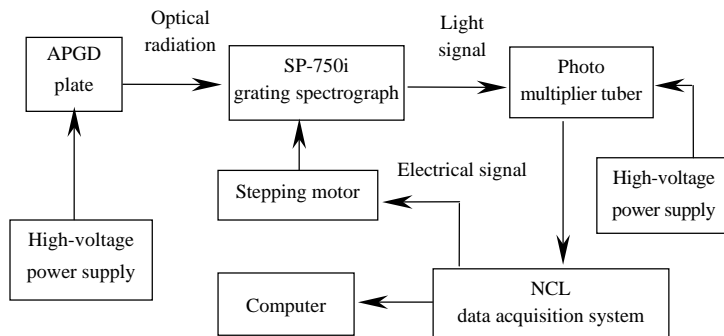


图3 光学测量系统简图

Fig.3 Sketch of optical measuring system

表1 若干实验电极板参数

Table 1 Parameters of four electrode plates

| Serial No. | d/mm | D/mm |
|----------------|--------|--------|
| P ₁ | 0.5 | 10 |
| P ₂ | 0.3 | 10 |
| P ₃ | 0.3 | 7 |
| P ₄ | 0.5 | 7 |

除了进行光谱测量外，本文还对 APGD 放电时发出的空气电离声响和电极板的温度变化进行了测量。APGD 放电时的空气电离声响是等离子体声辐射的表现，而电极板的温度升高则反映了 APGD 等离子体的热辐射。实验中采用噪音计测量放电时的空气电离声响的强度，而电极板的温度测量则是采用无接触式测温计。

2 数据处理与分析

2.1 光辐射特性

本文通过实验测量和数据处理后获取了不同加载功率下的沿面 APGD 低温等离子体的辐射光谱(图4为所获得光谱图中的一幅)。虽然 APGD 工作时可清晰地观察到放电的紫色光芒，但光栅光谱仪扫描得到的光谱图表明，APGD 的辐射光谱很丰富，主要分布在紫外到可见紫光范围，而且紫外区段的辐射要强得多。即光谱在280~420nm的波长范围内，特别是波长在340nm左右有很高的峰值，而其他波长的光强则较弱，紫光的光强与谱线高频率相比几乎接近于零。

谱线峰值的高低反映了 APGD 低温等离子体中电子

数量和离子数量的多寡，即电子密度值的大小；等离子体的另一重要参数——电子温度则对应 APGD 等离子体总能量。光辐射的总能量，加上声辐射和热辐射能量占了等离子体的总能量的很大部分。因此，光谱的峰值以及光辐射总能量、声辐射强度和热辐射强度随加载功率的变化规律是本文关注的重点。

光谱的峰值可从光谱图上直接获取，而光辐射总能量可以光谱曲线下的面积积分来表示。从本质上说，本文研究的 APGD 等离子体产生的原理是沿面介质阻挡放电。它是一种非平衡态的、非稳定的和不均匀的放电。因此，本文为了使处理后数据结果能全面反映 APGD 的光辐射特性，同时也使结果的分析更科学更具通用性，对测量所得的光谱数据在空间和时间上进行平均化处理^[6]。处理所得的结果如图5和6所示。

从图中可以看出不同结构电极板的光谱最大峰值平均值 I_{pm} 和光谱面积积分平均值 I_{am} 都是随加载功率 P 线性增加的。这反映出放电电极板所产生低温等离子体的特性参数——电子密度是随加载功率增加而增大的。

另一方面，图中曲线也反映出电极板结构，即电极条的布置对光辐射强度有较大的影响。在本文研究的范围内，当电极条间距 D 相同时，电极条 d 宽，则 APGD 光谱的峰值 I_{pm} 和光谱面积积分平均值 I_{am} 都

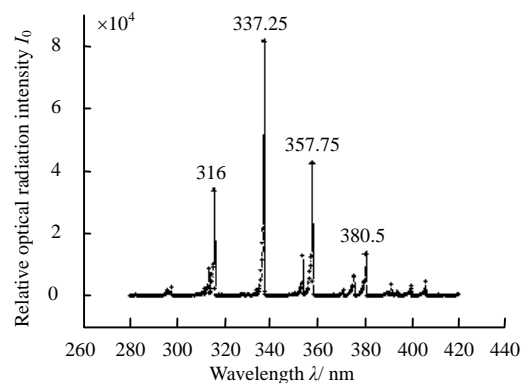


图4 光栅光谱仪测得的 APGD 光谱图

Fig.4 Spectra acquired by grating spectrograph

较大；而当电极条宽度 d 相同时，电极条间距 D 大者 APGD 光谱的峰值 I_{pm} 和光谱面积积分平均值 I_{am} 也高，而且 D 的影响要比 d 明显。

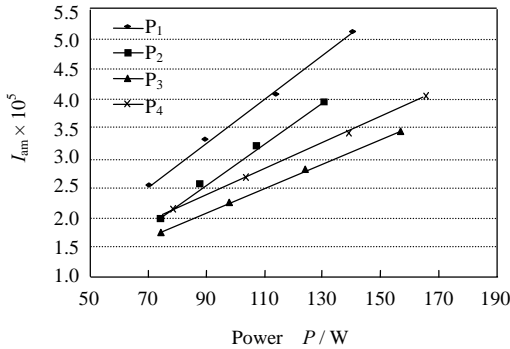


图 5 不同结构电极板的 I_{am} vs. P

Fig.5 I_{am} vs. P of different electrode plates

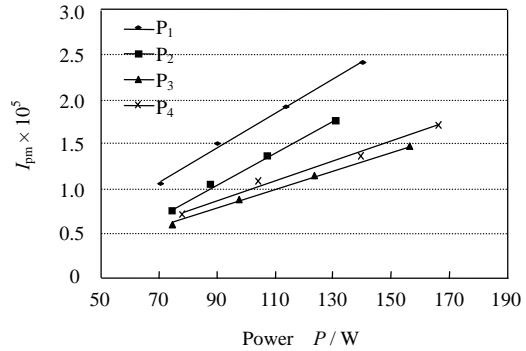


图 6 不同结构电极板的 I_{pm} vs. P

Fig.6 I_{pm} vs. P of different electrode plates

注意到图 5 和图 6 给出的都是一根电极条的放电辐射光谱结果，就可以解释以上现象。在对电极板加载同样功率时，每块电极板的两个电极上聚集的总电能是一样的。假设这些电能均分到每根电极条，那么对电极条布置较密集的情况，即 D 较小时，单根电极条分配到的电能就较少，放电强度也较弱，因此板 3 和板 4 测得的光辐射强度较低。而在电极条密集度相同的情况下，电极条 d 较宽时，会使电极板的静态电容增大，这样单根电极条分配到的相同电能被转化为光辐射的能量较大，从而使板 1 和板 4 测得的光辐射强度分别会比板 2 和板 3 测得的较高。

2.2 声辐射特性与热辐射特性

实验中也同时对 APGD 放电进行了声辐射和热辐射的测量，所测得的声辐射强度 I_s (以放电噪声的分贝值 dB 表示)和热辐射强度 I_r (以 APGD 放电区的温度值 表示)随功率变化的情况在图 7~8 中给出。由于四块电极板的实验结果较接近，为表示清楚，图中只给出其中的两条曲线。实验结果表明不同结构电极板的放电噪音声强和热辐射也是随加载功率线性增强的。

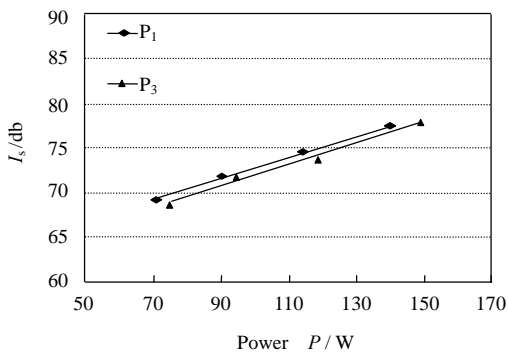


图 7 不同结构电极板的 APGD 噪音 I_s vs. P

Fig.7 I_s vs. P of different electrode plates

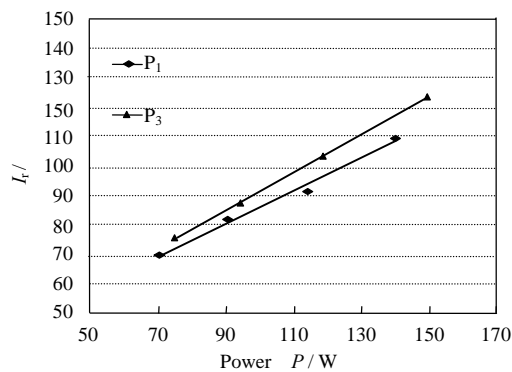


图 8 不同结构电极板的 APGD 温度 I_r vs. P

Fig.8 I_r vs. P of different electrode plates

于是，得到的实验结果反映出由光辐射、声辐射和热辐射总能量对应的等离子体另一特性参数—电子温度也是随加载功率增加而线性增大的。

从图 5~8 中各种形式的辐射能量随功率变化呈线性关系还可以看出，对于确定的一块电极板而言，随着加载功率的增大，APGD 所产生的低温等离子体的总辐射能量也是线性增加的，而且光辐射、声辐射和热辐射各自所占的能量比例总是一定的。这一研究结果比较全面地反映了常压放电产生的低温等离子体的辐射特性，也提示了进一步深入研究的方向。

3 结 论

本文采用 APGD 方式在自行设计的电极板平面上产生出一薄层的低温等离子体,依据其具有的光、声、热辐射特性,分别利用光栅单色仪、噪音计和无接触式测温计对 APGD 放电产生的等离子体的光辐射、声辐射及热辐射特性进行了测量分析。

数据处理结果表明,光谱面积积分平均值和光谱最高峰值平均值随 APGD 加载功率变化均呈线性增加关系,放电噪音声强和热辐射也与加载功率基本上呈线性增强关系,电极板的结构(电极条布置情况)会影响 APGD 的辐射强度。

研究结果说明在获得沿面 APGD 的辐射特性与加载功率之间的关系后,通过它来控制等离子体的产生量是可行的。这为有效地利用 APGD 低温等离子体提供了一种简便的途径,也为深入研究 APGD 等离子体,寻找 APGD 等离子体特性参数的表达方式奠定了基础。

参考文献：

- [1] ROTH J R. **Industrial Plasma Engineering - Volume 2 : Applications To Nonthermal Plasma Processing**[M]. Bristol and Philadelphia , London : Institute of Physics Publishing , 2001.
- [2] 管井秀郎. 等离子体电子工程学[M]. 张海波, 张 丹. 北京: 科学出版社, 2002.
SUGAI Hideo. **Plasma Electronic Engineering**[M]. ZHANG Hai-bo , ZHANG Dan. Beijing : Science Press , 2002.
- [3] 任兆杏, 丁振峰. 低温等离子体技术[J]. 自然杂志, 1996, **18**(4): 201-207.
REN Zhao-xing , DING Zhen-feng. Low Temperature Plasma Technology[J]. **Journal of Ziran** , 1996 , **18**(4) : 201-207.
- [4] 李成榕, 王新新. 大气压下的辉光放电[J]. 高电压技术, 2002, **28**(12): 41-43.
LI Cheng-rong ,WANG Xin-xin. Atmospheric Pressure Glow Discharge (APGD)[J]. **High Voltage Engineering** ,2002 ,**28**(12) :41-43.
- [5] 张 锐, 刘 鹏, 詹如娟. 大气压辉光放电研究现状及应用前景[J]. 物理, 2004, **33**(6): 430-434.
ZHANG Rui ,LIU Peng ,ZHAN Ru-juan. Status and Application Prospects of Atmospheric Pressure Glow Discharge Studies[J]. **Physics** , 2004 , **33**(6) : 430-434.
- [6] 林 麒, 任庆磊. 常压空气辉光放电等离子体光辐射特性试验[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, **44**(5): 621-624.
LIN Qi , REN Qing-lei. Investigation in Radiation characteristic of Atmospheric Pressure Glow Discharge Plasma in Air[J]. **Journal of Xiamen University (Natural Science)** , 2005 , **44**(5) : 621-624.

~~~~~  
(上接第 31 页)

#### 参考文献：

- [1] PELIE. Feature Detection Algorithm Based on A System Model[J]. **Proceedings of IEEE** , 2002 , **90**(1) : 78-93.
- [2] CASTLEMAN K R. **Digital Image Processing**[M]. New Jersey : Prentice Hall , Inc , 1996.
- [3] 张天序. 复杂图像序列的自适应目标提取和跟踪方法[J]. 电子学报, 1994, **22**(10): 46-53.  
ZHANG Tian-xu. An Adaptive Approach to Object Extraction and Tracking in Complex Image Sequences[J]. **Acta Electronica Sinica** , 1994 , **22**(10) : 46-53.
- [4] 周 晓, 任仙怡. 仿射模型目标跟踪中的一种模板修正策略[J]. 中国图象图形学报, 2002, **11**(7): 1171-1175.  
ZHOU Xiao , REN Xian-yi. Template Update Method in Target Affine Tracking[J]. **Journal of Image and Graphics** , 2002 , **11**(7) : 1171-1175.
- [5] ACEX 1K Programmable Logic Device Family Data Sheet[Z]. Altera Incorporated , 2001.
- [6] TMS320C6000 Code Composer Studio Manuals[Z]. Texas Instruments Incorporated , 2001.
- [7] ZHONG Y , JAIN A K , DUBUISSON J M. Object Tracking Using Deformable Templates[J]. **IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence** , 2000 , **22**(5) : 544-549.