

常压下低温等离子体光辐射特性测量

任庆磊, 林 麒*

厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005

摘 要 采用常压空气辉光放电(APGD)技术在自行设计的电极板表面产生出一薄层低温等离子体, 并利用光谱诊断光学系统对所产生的等离子体进行光辐射特性实验测量; 实验获取了几种电极板在几个不同加载功率下的辐射光谱, 并对光谱的辐射强度进行平均化处理分析。分析结果表明此沿面 APGD 的光辐射强度与加载功率之间存在线性增加的关系, 且随电极板静态电容的增加而增强。该方法可以为控制 APGD 等离子体的产生量提供一种简便可行的途径。

主题词 低温等离子体; 常压空气辉光放电; 光辐射特性; 光谱测量

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)11-2116-04

引 言

常压空气辉光放电(APGD)等离子体在材料表面改性、环境保护、臭氧合成、医学和航空等诸多领域有着重要的应用价值^[1], 对其进行深入研究是非常有意义的。

为了有效地加以应用, 有必要研究了解 APGD 等离子体的特性。目前对其电子温度和电子密度等特性参数的测量诊断还未见有相关文献, 一直缺少一种有效的诊断方法。这在很大程度上影响了这种等离子体的有效定量应用。

注意到等离子体具有光辐射特性, 这就使人们有希望从其光辐射特性中获得定量描述 APGD 低温等离子体的方法。由光谱测量分析得到的光谱强度和谱线的分布与等离子体的电子温度等参数之间肯定存在某种必然的关联性质^[2, 3], 虽然人们一时还无法给出它们之间的这种关系, 但光辐射特性仍然从一个侧面定量地反映了等离子体的强度。因此, 本文采用光谱测量的方法对 APGD 等离子体进行光辐射特性研究, 分析它的定量变化规律, 试图对该类等离子体的测量诊断方法进行探讨。

1 APGD 装置及原理

APGD 等离子体发生装置如图 1 所示, 主要由放电电极板和高压电源组成。电极板的基板介质材料分别有两种: 环氧树脂玻璃纤维和聚四氟乙烯玻璃布, 其结构为约 0.1 mm 厚的铜膜覆于 1 mm 厚的介质板两侧作为电极, 电极的形式

一侧为细条状, 一侧为片状(示意图见图 1)。电极条在介质板上均匀相间平行分布。

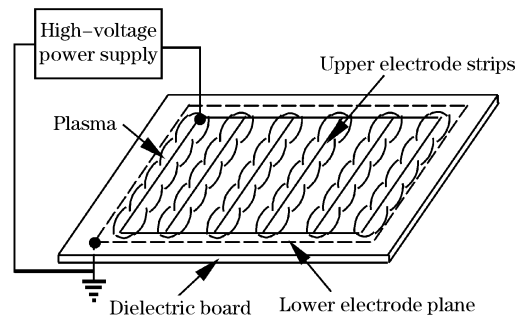


Fig. 1 The illustration of APGD plasma device

当对两侧电极加载高压交流电时, 电极条两侧便发生放电现象, 产生低温等离子体, 同时发出可见的紫色光芒。图 2 为所摄沿其中一块电极板平面的 APGD 实验照片。

从本质上说, 这种 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。由于两放电电极之间有一绝缘介质板, 当对两电极加上高电压时, 绝缘介质板表面即感应出与附于板上同侧的电极极性相反的电荷, 在绝缘板表面与电极条之间建立起足够强度的电场, 从而使它们之间敞开在大气压下的空气发生电离放电。由于这种空气电离放电是在高频脉冲电压作用下发生的, 所以沿面 APGD 实际上是由一系列的脉冲微放电组成的。对这种放电产生的等离子体, 测量它的瞬态参数对于工程应用没有什么意义。因此, 在光谱测量实验中和数据处理

收稿日期: 2005-08-28, 修订日期: 2005-12-16

基金项目: 福建省自然科学基金(A0410001)资助项目

作者简介: 任庆磊, 1981 年生, 厦门大学物理与机电工程学院硕士研究生 * 通讯联系人

时都必须考虑这些因素,采取必要的措施,如进行空间平均和时间平均处理。

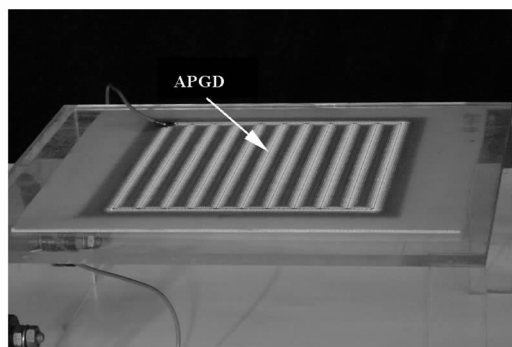


Fig. 2 APGD in air on the flat plan

2 光谱测量实验

本文采用如图 3 所示的光学系统对所产生的等离子体进行光辐射测量实验。图中的光学器件为 SP-750i 光栅光谱仪,其工作波长范围为 180~2 700 nm,涵盖了沿面 APGD 发光的波长范围。沿面 APGD 工作时,等离子体发射的光线经过光栅光谱仪后由光电倍增管将采集的光信号转变为电信号并加以放大而记录下来。测量到的电信号的大小直接反映了光信号的强弱。由光谱仪扫描记录的数据经 Origin 软件处理后得到相对辐射强度的光谱图(如图 4 所示)。

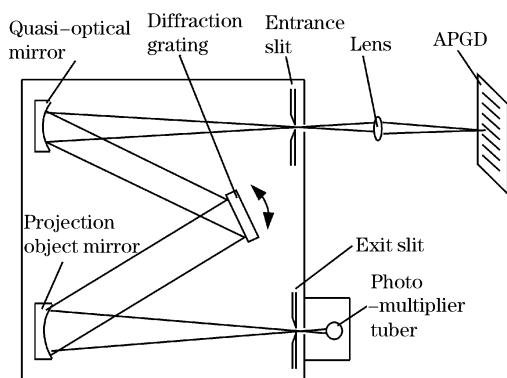


Fig. 3 The optical system for spectrum diagnosis of APGD

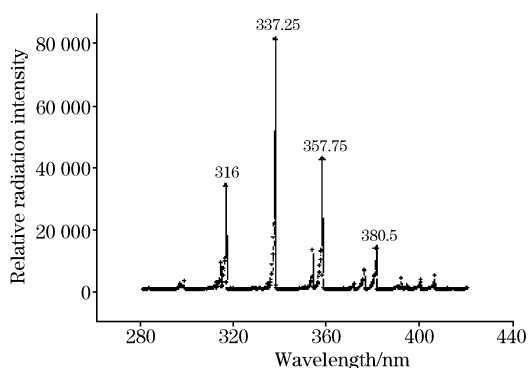


Fig. 4 The spectra of APGD by grating spectrograph

从光谱图可以看出,APGD 等离子体的辐射光谱很丰富,在 280~420 nm 的波长范围内有较明显的峰值,即从紫外到可见光都有不同的辐射强度,但最强的是在紫外区段。可见虽然 APGD 工作时可见到紫色光谱,但那还不是主要的辐射成分。

当加载功率 P 不同时,APGD 的放电强度不同,所产生的低温等离子体强度也不同。故本文在几块电极板的正常工作范围内选择了四个不同的加载功率 P 进行测量,考察沿面 APGD 放电的光辐射特性随功率 P 变化的规律,从而寻找比较简便的控制 APGD 产生等离子体的“量”的方法。

实验所用电极板上的电极条是间隔分布的,所以沿面 APGD 产生的等离子体是不均匀的。当放电强的区域对准光栅光谱仪入射狭缝时,其扫描所得的光谱峰值会比较高,反之则较低。为使所测量的结果全面反映沿面 APGD 的光辐射特性,对实验方案进行如下设计:安装电极板时使电极条处在水平状态,将电极板垂直安放并距狭缝 20 mm,板的中央部分对准入射狭缝(见图 3),这样相对于入射狭缝有限面积的电极板 APGD 可近似地视为无限大平面的 APGD;在相同的加载功率 P 下,调整电极板的垂直安装高度,调整范围与电极条的间距相同;用光栅光谱仪扫描并记录下电极板处于各高度时沿面 APGD 的光谱,以便进行空间平均处理。

虽然放电具有非平衡非稳定性,但整个 APGD 发光波长的扫描过程需花费几分钟,与脉冲微放电的周期相比,足以保证测量数据时间上的平均。

测量中发现,即使电极板上的电极条分布不同或者改变电极板的上下相对位置或改变加载功率,光谱的谱线分布都是相同的,不同的只是其强度。这是因为 APGD 在空气中工作,被电离的气体总是氧气、氮气及少数其他气体,所测得的谱线正是对应这些气体电离时释放出的光能。

3 数据处理及分析

根据沿面 APGD 的工作情况和图 4 的光谱,本文考虑从两个角度来分析 APGD 的相对光辐射强度与加载功率之间的关系。一是直接寻找 APGD 光谱最高峰值与加载功率 P 之间的关系;二是对测得的光谱图进行面积积分,求其与加载功率 P 之间的关系。由于放电的不均匀性,故描述光辐射强度与加载功率之间的关系时,用光谱最高峰值平均值 I_{pm} 和面积积分平均值 I_{sm} 更科学且更具一般性。

虽然光谱图中有几个峰值,但是最高峰值 I_{0max} 总是在图 4 中的波长 $\lambda=337.25$ nm 处。而光谱线下的面积 I_a 可以用公式(1)求得,积分时取 I_0 的基准近似为 0。

$$I_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0 d\lambda \quad (1)$$

根据实验方案,对于同一块电极板,加载相同功率,可以获得对应电极板在不同位置高度时的辐射光谱最高峰值和积分面积值。图 5 为其中一块电极板的这两个数值随其相对于入射狭缝的高度 z 变化的曲线。根据图 5 的曲线可以利用空间积分公式(2)与(3),求得此加载功率下光谱最高峰值平均值 I_{pm} 和面积积分平均值 I_{sm} 。

$$I_{pm} = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} I_{0max} dz \quad (2)$$

$$I_{am} = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} I_a dz \quad (3)$$

从而确立这块电极板的光辐射强度随加载功率变化的数据曲线,如图 6 所示。

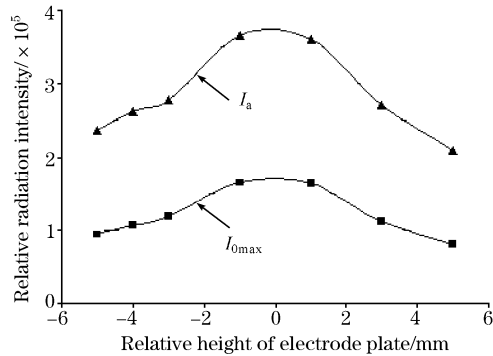


Fig. 5 The radiation intensity of APGD at given power

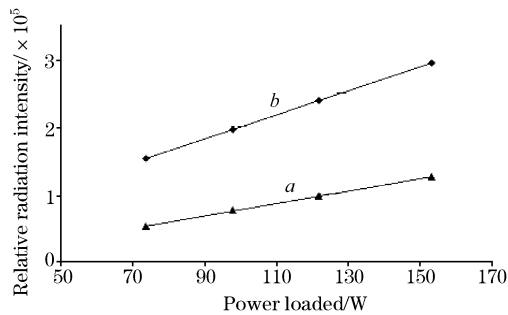


Fig. 6 The radiation intensity of APGD vs power

a: I_{pm} vs P ; b: I_{am} vs P

从处理结果图 6 可以看出 APGD 等离子体的光辐射强度与加载功率是呈线性关系的。

本文认为谱线峰值高低反映了所产生的低温等离子体中的电子数量和离子数量,即电子密度。峰值高,对应的电子密度就大。反之则低。图 6 中的曲线 a 表明 I_{pm} 随 P 呈线性增长。当然,电子密度随 P 的增长不一定是线性的,但可以判断会是呈增长趋势的。

等离子体的另一重要参数是电子温度,它反映的是等离子体总体能量的大小。而光谱线下的面积代表了电极板的总辐射能量,可以从一个侧面描述等离子体的总能量。图 6 中的曲线 b 表明 I_{am} 与加载功率 P 呈线性关系,这个结果与随加载功率 P 增大,放电强烈,电子温度升高的规律是一致的。

对不同电极板进行相同的测量实验,并对获取的数据进行如上所述的相同处理后,所得结果如图 7 与图 8 所示。显然,不同电极板 APGD 等离子体的光辐射强度与加载功率密度 $Q(P$ 与电极板上电极条的总面积之比)总是呈线性关系。

同时,对处理结果图 7 和图 8 分析后发现,在加载功率密度 Q 相同的条件下,APGD 产生等离子体的光辐射强度随电极板的参数而变化,也就是说,各实验曲线的斜率是不同

的。本文实验研究所采用的不同电极板的区别在于各板上电极条的宽度 d 和间距 D 、电极板基材的介电常数 ϵ 、板的厚度 L 有所不同,而这些参数却决定了放电电极板的静态电容。

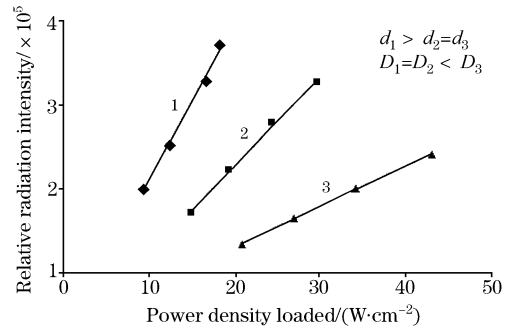


Fig. 7 The radiance of the APGD plasm on the plates with different layout of electrode strips

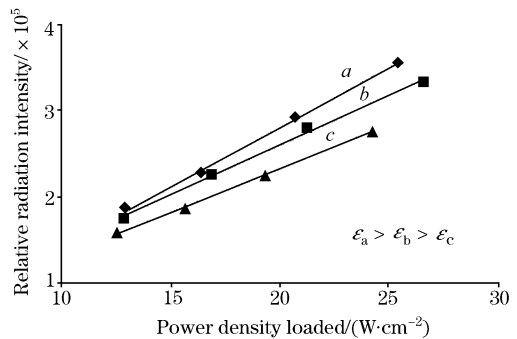


Fig. 8 The comparison of three APGD plates with different dielectric coefficient ϵ

虽然电极板两面的电极构成分布电容,但其静态电容值仍可以通过平行板电容的计算公式(4)来近似得到

$$C = \epsilon S / L \quad (4)$$

式中, C 为电容值, ϵ 为电极板基材介质的介电常数, S 为两电极相对面积, L 为板基材厚度。

当电极条宽度增大或密集时, S 会增大,则静态电容增大,图 7 中曲线 2 的电极条比曲线 1 的电极条窄但间距相同,而与曲线 3 的电极条一样宽但间距较小。因此,曲线 1 的电极板的静态电容最大,而曲线 3 的最小,这与用仪表实际测得的电极板静态电容的结果相一致。实验结果表明,曲线 1 的光辐射强度最大而曲线 3 的最小,这说明电极板的静态电容越大其放电光辐射强度越强。不仅如此,随着加载的功率密度增大,静态电容大也使得放电光辐射急剧增强。

由公式(4)知, ϵ 大,则静态电容越大。图 8 中三条曲线对应的电极板的区别仅在于基板介质不同,它们的介电常数大小依次是 $\epsilon_a > \epsilon_b > \epsilon_c$,实验结果同样表明电极板的静态电容越大其放电光辐射强度越强。

以上研究结果表明,电极板的静态电容明显影响 APGD 的工作情况,从而改变等离子体光辐射的强度,即 APGD 等离子体的光辐射强度与电极板的静态电容有关。因此,在电

极布局相同的情况下,可以通过改变电极板的静态电容来调整 APGD 产生的低温等离子体的量。

4 结 论

本文采用常压空气辉光放电(APGD)技术在自行设计的电极板表面产生出一薄层低温等离子体,并首次采用光谱测量方法对所产生的等离子体进行了光辐射特性研究。研究结果表明沿面 APGD 的光辐射强度与加载功率之间存在线性

关系,且随电极板静态电容的增加而增强,通过这些关系来控制等离子体的产生量是可行的方法,这为有效地利用 APGD 低温等离子体提供一种简便的途径。

若能寻找出 APGD 等离子体光辐射特性与电子温度、电子密度等等离子体特性参数的关系,则能更好地进行定量描述;另外 APGD 等离子体还存在其他能量的辐射特性(热辐射和声辐射等),这些能量的辐射与加载功率之间存在怎样的分配关系将是下一步的研究内容。

参 考 文 献

- [1] Roth J R. Industrial Plasma Engineering -Volume 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing. London: Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2001.
- [2] JIANG Nan, TAO Xiao-feng, LING Yi-ming(江 南,陶晓峰,凌一鸣). Vacuum Science and Technology(真空科学与技术), 2000, 20(2): 108.
- [3] TANG Xiao-liang, FENG Xian-ping, LI Zhi-guang, et al(唐晓亮,冯贤平,黎志光,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(11): 1437.

Experiment on Optical Radiation Characteristic of Low Temperature Plasma at Atmospheric Pressure

REN Qing-lei, LIN Qi*

School of Physics and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract The experiment on the optical radiation performance of a low temperature plasma due to atmospheric pressure glow discharge (APGD) in air was carried out in the present paper. A set of APGD devices were created successfully and a thin layer of plasma can be produced on the planar surface of designed electrode plate. The measurement was carried out on the optical radiation characteristic of the plasma with a grating spectrograph system. The investigation was made to several different electrode plates. The radiation spectra of several electrode plates with different power loaded were acquired. The data obtained show that the APGD optical radiation intensity grows linearly with the applied power, and increases with the static capacitance of the electrode plate. The study proves that it is feasible to control APGD plasma quantitatively and effectively by using the obtained relationship.

Keywords Low temperature plasma; APGD; Optical radiation characteristic; Spectra measurement

(Received Aug. 28, 2005; accepted Dec. 16, 2005)

* Corresponding author