

低温等离子体的光谱测量研究^①

任庆磊^② 林 麒^a

(广东工业大学机电工程学院实验中心B06 信箱 广州市番禺区广州大学城外环西路 100 号 510006)

^a(厦门大学机电工程系 福建省厦门市 361005)

摘 要 采用光谱测量法研究低温等离子体特性具有突出的优点。阐述了目前光谱测量用于低温等离子体研究的原理和分析方法, 将运用光谱描述等离子体的方法概括成直接分析和间接分析两类。本文采用光谱测量的方法对常压空气辉光放电 (APGD) 等离子体进行了研究, 得到了 APGD 等离子体光辐射特性随所加功率呈线性关系的结果, 为常压空气辉光放电等离子体的光谱诊断建立了基础。

关键词 光谱测量, 低温等离子体, 气体放电。

中图分类号: O 536; O 433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-8138(2007)05-0839-05

1 引言

低温等离子体是近年来发展起来的一门新技术, 它已被应用于诸多领域, 如臭氧合成、材料改性处理、家用电器、航空等领域。但是对低温等离子体特性参数的诊断方面, 一直缺乏有效的手段, 这在很大程度上制约了对低温等离子体的应用。

采用光谱测量方法对等离子体进行诊断有着突出的优点, 它可以做到非接触式的测量, 从而使得相应的研究备受关注^[1-3]。本文首先对目前采用光谱测量法研究低温等离子体的现状进行些总结分析, 在此基础上, 运用光谱测量的方法对常压空气辉光放电 (APGD) 低温等离子体进行测量, 并分析了测得的有关光谱分布图, 得到了 APGD 低温等离子体的光辐射特性随加载功率线性变化的规律。所获得的结果可作为光谱诊断 APGD 等离子体的前期工作。

2 低温等离子体特性表征与测量

等离子体作为物质的“第四态”, 是在一定温度下由带负电的自由电子和带正电的离子以及一些中性粒子组成的电离气体, 其宏观上呈近似电中性。

若等离子体中的粒子在碰撞过程中能量交换较少, 虽然电子温度 (一般不大于 1eV) 远远高于离子及中性粒子的温度, 但由于电子的质量要小得多, 而离子及中性粒子在碰撞中获得的能量有限, 温度变化不大, 故整体处于非热平衡状态, 此状态下的等离子体为低温等离子体。就其整体来说, 温度并不高, 只不过几百度甚至接近室温, 例如日光灯管中的等离子态物质^[4]。

低温等离子体的产生方法一般采用气体放电形式, 产生过程会伴随着光、热、声的辐射。描述低温等离子体的特性参数有很多, 但是其中的电子密度、电子温度是最重要的参数。这些参数的诊断

① 福建省自然科学基金资助项目 (A 0410001)

② 联系人, 电话: (020) 39322229; 手机: (0) 15920179558; E-mail: xintairen@126.com

作者简介: 任庆磊 (1981—), 男, 山东省新泰市人, 硕士, 广东工业大学机电工程学院实验中心工作, 主要从事低温等离子体研究。

收稿日期: 2007-06-14; 接受日期: 2007-06-30

测量有助于了解等离子体的特性,也有利于等离子体的控制应用。

传统较常使用的等离子体特性参数诊断方法是 *Langmuir* 静电探针法。*Langmuir* 探针诊断法在低气压条件下应用较多,有关的理论与技术研究相对较成熟。此方法的局限性在于应用面不够广,只适用于真空度较高的条件下气体放电产生的等离子体,这是由 *Langmuir* 探针法的理论应用前提条件所决定的,即等离子体中电子的平均自由程要大于 *Langmuir* 探针周围鞘层的德拜长度。此外,*Langmuir* 探针测量时需介入等离子体中,会造成干扰从而形成系统误差。其实,等离子体的各种特性使得人们可以利用来诊断它,尤其是它的发光特性。因此除了 *Langmuir* 探针法外,光谱诊断法是比较可行的一种方法。该法依据等离子体所具有的光辐射特性,无需介入等离子体,不会干扰等离子体区域,不受制于探针法的局限性,应用范围更广,具有无干扰更便捷高效等优点。

3 光谱测量与分析

目前,由于低温等离子体产生装置的不同,采用光谱法测量的装置也各式各样,但测量原理基本上是相同的。考虑到等离子体的产生条件(如气体成分、放电气压等)及应用场合不同,对光谱测量结果的分析角度和分析过程及其结论会有所不同。

光谱测量原理的示意图如图 1 所示。根据实际实验需要,可采用不同类型的光谱测量仪器对所产生的等离子体进行光辐射测量,再由光电转换器件将光信号转化为电信号,最后采集到计算机里储存下来以备数据处理。

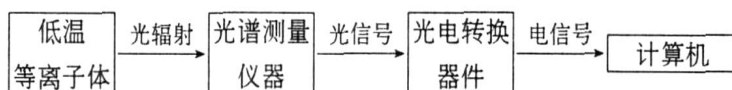


图 1 光谱测量原理的示意图

实验测得的光谱数据包含的信息主要有谱线波长、谱线的相对强度和谱线的轮廓及宽度,在目前光谱法研究等离子体的数据分析方法中,这些信息都在考察范围之列。

文献[5]和[6]中介绍,利用谱线的波长可以确定在产生等离子体的气体放电过程中存在哪些物质成分,并且可以用来分析相应的能级跃迁及辐射通道,从而推断出放电的微观过程与等离子体的形成途径。

参考文献[7]给出谱线的绝对强度可用以下公式表示:

$$I_{mq} = A_{mq} h \nu_{mq} \alpha_n C N_e^4 (k T_e - E_m) \sqrt{m / (2 \pi k T_e)} \exp[-E_m / (k T_e)] \quad (1)$$

式中: A_{mq} —— m 态到 q 态的跃迁概率; h —— 普朗克常数; ν_{mq} —— 谱线频率; C —— 常数; N —— 气体分子密度; N_e —— 电子密度; E_m —— m 能级能量; α_n —— 能级的碰撞截面; k —— 玻尔兹曼常数; T_e —— 电子温度。从式(1)中可看出等离子体的电子密度和电子温度也参与决定谱线的强度。这样,通过光谱中的谱线强度就可以定性分析所测量等离子体的电子密度和电子温度的变化。并且文中还对探针法和光谱法测量电子温度进行了对比分析。

文献[8]和[9]则用同一元素的两条谱线的相对强度之比:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_1}{A_2 g_2 \lambda_2} \exp[-(E_2 - E_1) / k T_e] \quad (2)$$

来定量计算所测等离子体的电子温度。式中: I_1, λ_1 和 I_2, λ_2 —— 分别为谱线 1 和谱线 2 的相对强度和波长; A_1, g_1 和 A_2, g_2 —— 分别是能级 E_1 和 E_2 的跃迁概率和统计权重; T_e —— 电子温度; k —— 玻尔兹曼常数。

一般采用谱线的半宽度 Δ 来表征谱线的轮廓,而决定谱线宽度的主要因素有:由粒子固有的能级所决定的自然宽度、由粒子无规则热运动引起的多普勒(Doppler)变宽、由粒子的相互碰撞作

用引起的共振变宽和罗仑兹(Lorentz)变宽、由斯塔克(Stark)效应与塞曼(Zeeman)效应分别所致的斯塔克变宽和塞曼变宽。其中斯塔克变宽是电子密度的函数, 这样可以通过精确测量谱线的宽度来计算得到等离子体中的电子密度^[10]。文献[9]和文献[11]介绍了如何运用斯塔克展宽获得实际产生的等离子体的特性参数——电子温度。

以上文献都通过测得的光谱信息及相关理论来分析等离子体的内在机理并确定其特征参数, 这种描述等离子体的方法可归属于光谱直接分析法。此类研究工作很有价值, 对实际应用有着指导意义, 因而倍受研究者的重视。

目前光谱直接分析方法还不能应用于任何场合的等离子体, 采用这种分析方法的文献中所测量的等离子体基本上都是在单一气体中产生的, 对于多成分组成的混合气体放电产生的低温等离子体及非平衡态较高的等离子体, 由于放电过程复杂, 光辐射受影响因素较多, 谱线直接分析的理论模型应用起来较困难, 即使能在诸多假设条件下应用分析, 也会造成结果偏差很大, 失去实际意义。

在这种情况下, 研究者改为采用光谱间接分析方法来描述等离子体。其分析过程一般是找出所测等离子体的谱线信息与一些可以直观控制的参量之间的关系, 如找出谱线强度随气体放电电压、频率、气体压强等参数变化的规律^[12, 13], 为控制等离子体提供直观的依据。而这种间接分析方法对等离子体的产生设备及测量仪器依赖性很强, 从而使得找出的定量规律可移植性较差, 很多只能针对具体给定的场合测量分析。

因此, 需要将两种分析方法结合起来使用才能更好地描述低温等离子体。

4 A PGD 低温等离子体光谱测量研究

本文采用光谱测量法对在常压空气环境下产生的沿面低温等离子体进行研究^[14, 15], 其中光谱分析的过程采用的是间接分析方法。这是由于所研究的等离子体的生成方式为在敞开的空气环境中对电极板加载高频高压电源进行气体放电, 且这种常压空气辉光放电(A PGD)属于非平衡态、非均匀的沿面介质阻挡放电, 这使得通过测量来得出其等离子体的特征参数变得很困难。

本文实现A PGD产生低温等离子体的实验装置及放电结果如图2所示。其中放电电极板是由双面PCB板制成, 一面的铜膜被制成均匀相间平行分布的细条状电极, 另一面电极成片状。加载高压电源后, 每一电极条两侧均发生气体放电(见图2中箭头所指), 产生沿面低温等离子体, 同时发出可见的紫色光芒。

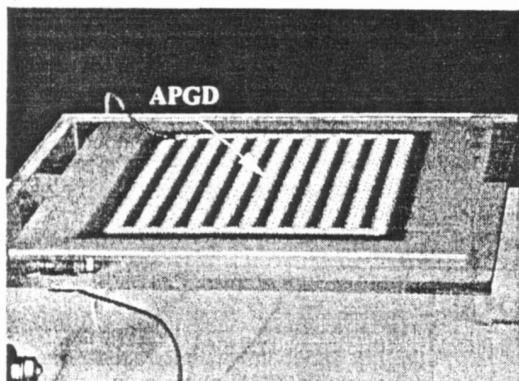


图2 沿电极板平面A PGD 放电实验

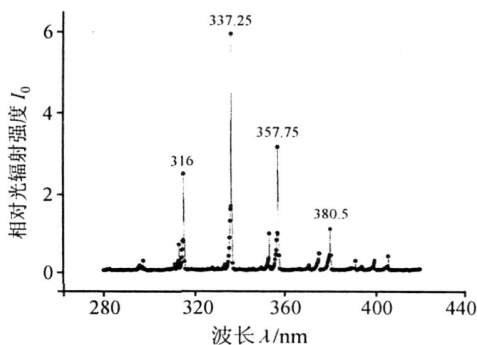


图3 光栅光谱仪测得的光谱图

本文采用 Sp-750i 型光栅单色仪测量(美国 A cto Inc)A PGD 的辐射光谱。该单色仪有三个光栅,工作波长为 180—2700nm,经扫描测试,它们覆盖了沿面 A PGD 发光的波长范围。由于 A PGD 放电的不均匀性,实验中具体的 A PGD 光谱测量方法为:将电极板中央的电极条对准单色仪的入射狭缝,在不改变加载功率的情况下,沿垂直于电极条的方向平移电极板,改变若干测量位置,并使移动的范围包含该电极条附近的放电不均匀区域,其余电极条的放电可视为空间周期性重复。对同一块电极板改变加载放电功率,便可得到不同功率下 A PGD 等离子体的光辐射特性。给定功率下每个位置测得的 A PGD 低温等离子体光辐射谱线如图 3 所示。

本文对测得的辐射光谱进行了数据处理和分析。处理数据后得到 A PGD 等离子体的光辐射特性——光谱最高平均强度 I_{pm} 和谱线面积积分平均强度 I_{am} ——随加载功率变化的规律。

本文对若干电极分布不同的电极板(不同结构的电极板对应不同的静态电容 C)进行了测量和分析,获得了在相同加载功率范围内 A PGD 低温等离子体的光辐射特性 I_{am} 随电极板静态电容 C 变化的规律。所得结果如图 4 和图 5 所示。

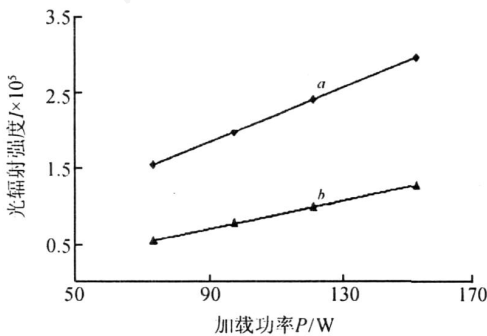


图 4 沿面 A PGD 光辐射强度随加载功率变化规律

a — $I_{am} \sim P$; b — I_{pm} 比 P_0

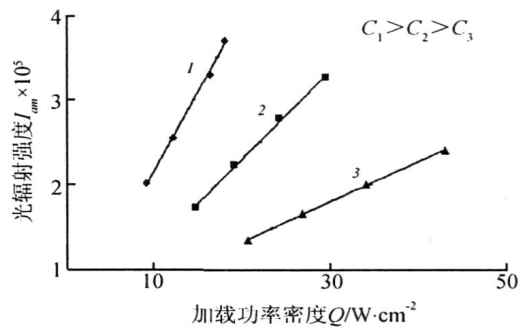


图 5 不同电极条布局的电极板光辐射强度随加载功率密度变化的对比图

1 — $I_{am} \sim Q$ (电极板的静态电容 C_1);

2 — $I_{am} \sim Q$ (电极板的静态电容 C_2);

3 — $I_{am} \sim Q$ (电极板的静态电容 C_3)。

研究结果表明 A PGD 放电产生的低温等离子体的光辐射强度随加载功率呈线性变化,即当电极板结构相似,而电极条分布不同时,随着加载功率的增大,光辐射强度都是增加的;而且光辐射强度还受电极板的静态电容的影响,它们之间的关系也是线性的,即当加载的功率密度相同时,光辐射强度随电极板静态电容的增加而增强。

5 结论

本文首先阐述了依据等离子体具有光辐射特性采用光谱诊断测量方法研究低温等离子体特性的优点,并对目前低温等离子体光谱测量研究的测量原理和分析方法进行了归纳分析,概括出光谱直接和间接两类研究等离子体的方法,提出这两种方法相结合更有助于分析研究低温等离子体特性的观点。

本文还运用光谱测量的方法对常压空气辉光放电(A PGD)低温等离子体进行了测量分析,得出 A PGD 放电产生低温等离子体的光辐射强度与被加载的功率呈线性关系,且随电极板静态电容的增加而增强。虽然目前还无法直接得到 A PGD 等离子体的特性参数电子密度和电子温度等,但本文的研究结果表明,通过这些关系来控制等离子体的产生量是可行的,这为有效地利用 A PGD 低温等离子体提供一种简便的途径。

参考文献

- [1] 张秀杰, 林烈, 吴彬. 高频感应等离子体风洞的光谱诊断[J]. 空气动力学学报, 2001, 19(1): 123—127.
- [2] 唐平瀛, 刘铁, 丁伯南等. 高频离子源等离子体的光谱诊断[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(3): 293—296.
- [3] 龚天林, 韩良恺, 杨晓华等. 等离子体参数的光谱测量法[J]. 原子与分子物理学报, 2004, 增刊: 63—66.
- [4] 任庆磊, 林麒. 等离子体改善飞机性能的应用[J]. 机电技术, 2004, 增刊: 239—242.
- [5] 张连水, 李裔, 赵晓辉. 介质势垒放电(DBD)等离子体中NO 荧光发射谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(1): 140—142.
- [6] 葛自良, 马宁生. 低温等离子体放电管发光光谱的检测分析[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 98—100.
- [7] 江南, 陶晓峰, 凌一鸣. 无声放电等离子体的光谱诊断[J]. 真空科学与技术, 2000, 20(2): 108—110.
- [8] 唐晓亮, 冯贤平, 黎志光等. 常压介质阻挡放电等离子体发射光谱诊断及其在材料表面改性中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(11): 1437—1440.
- [9] 陆同兴, 赵献章, 崔执凤. 用发射光谱测量激光等离子体的电子温度与电子密度[J]. 原子与分子物理学报, 1994, 11(2): 120—128.
- [10] C. 特哈斯, J. M. 默赫麦. 电感耦合等离子体光谱分析[M]. 万家亮, 唐咏秋译. 北京: 科学出版社, 1989.
- [11] Dong L F, Ran J X, Mao Z G. Direct Measurement of Electron Density in Microdischarge at Atmospheric Pressure by Stark Broadening[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(16): 161501.
- [12] 肖重发, 徐勇, 王文春等. 氮气大气压介质阻挡放电发射光谱诊断[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(5): 625—629.
- [13] 闫永辉, 冯贤平, 唐晓亮等. 从大气压到超低压范围的氦等离子体发射光谱的基本特性[J]. 光散射学报, 2004, 16(3): 242—245.
- [14] 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.
- [15] Ren Q L, Lin Q. Optical Radiation Characteristic Measurement of Low Temperature Plasma at Atmospheric Pressure[A]. 7th International Conference on Electronic Measurement & Instruments[C]. Beijing: ISTR, Aug, 2005, 16—18.

Study on Spectral Measurement of Low Temperature Plasma

REN Qing-Lei LIN Qi

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P. R. China)

a(Department of Mechanical & Electrical, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, P. R. China)

Abstract The spectral measurement has prominent advantages in the characterization of low temperature plasma. The direct and indirect analyzing methods are commonly used in the describing the plasma. The relevant study on spectral measurement of APGD plasma was described simply, which provides some references for studying low temperature plasma with spectral measurement.

Key words Spectral Measurement, Low Temperature Plasma, Gas Discharge

过期《光谱实验室》期刊免费赠送启事

本部尚有一些过期(2004, 2005 及以前)的期刊, 凡同行中有需要者均可免费赠送, 但邮费(含包扎费和人工费)自付, 每6本(不同期)为1个单元, 约重2—2.2kg, 普通印刷品收邮费(可用邮票支付)15元, 挂号另加3元。

有意者来信告知收件人姓名及详细地址, 同时将邮票放在信封中挂号寄来。

联系地址: 北京市81信箱66分箱《光谱实验室》编辑部联络处 刘建林, 邮编: 100095

《光谱实验室》编辑部