

电荷电压法测量 DBD 等离子体的放电参量*

张芝涛^{1,2,†} 鲜于泽¹ 白敏冬² 赵艳辉² 董克兵²

(1 东北大学理学院 沈阳 110006)

(2 大连海事大学环境研究所 大连 116026)

摘要 在 DBD 应用研究中,使用电荷电压法能够测量许多重要参量,如放电功率、放电间隙等效电容、电介质层等效电容、着火电压、放电间隙等效电压及放电间隙电场强度等。同时根据电荷电压图形随工作条件及状态变化的情况还可以诊断 DBD 等离子体的工作稳定性。文章对相关原理、模拟实验结果及实际应用效果进行了介绍。

关键词 介质阻挡放电,等离子体诊断, DBD, 电荷电压图形

Electrical characterization of dielectric barrier discharge plasma using the charge-voltage figure

ZHANG Zhi-Tao^{1,2,†} XIAN YU-Ze¹ BAI Min-Dong² ZHAO Yan-Hui² DONG Ke-Bing²

(1 School of Science, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

(2 Institute of Environmental Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract With the charge-voltage figure many key parameters may be obtained for studies on the applications of dielectric barrier discharge (DBD) plasma, such as the discharge energy, gap capacitance, dielectric capacitance, cut-in voltage, gap voltage, and discharge gap electric field. At the same time the stability of DBD plasma can be diagnosed by the charge-voltage figure which changes with changes in the operation conditions. The underlying principles, experimental simulation results and actual application developments are described.

Keywords dielectric barrier discharge, plasma diagnostic, DBD, charge-voltage figure

1 引言

近 20 年来,随着介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)技术及其应用研究不断取得进展^[1-6],越来越需要有相应的技术对 DBD 等离子体的放电参量进行测量与诊断。然而,由于 DBD 等离子体具有独特的微放电特性以及放电装置结构比较特殊,常规用于其他等离子体放电特性诊断的方法很难在 DBD 装置上使用。即使仅仅用于放电装置功率测量的功率表测量法、高压侧电流电压测量法等,在准确性方面也存在一些问题,因此对 DBD 等离子

体放电参量的测量与诊断已成为应用研究的瓶颈。

1975 年, Rosenthal 等人用电荷-电压($q-V$)图形法测量了用于材料表面处理的电晕放电功率^[7],之后又有一些研究者使用这一方法测量了放电装置的功率损耗^[8,9]。实际上,利用 $q-V$ 图形法测量 DBD 等离子体的放电参量就是将一无损耗标准测量电容器串入 DBD 装置的接地端,通过对外加激励电压及测量电容器上积累电荷量的测量,可以在示波器上获得一个 $q-V$ 图形,在较低频率(小于

* 国家自然科学基金(批准号 60031001)重点资助项目

2002-11-13 收到初稿, 2003-01-07 修回

† 通讯联系人, E-mail: newzhangzhitao@163.com

20kHz)时该图形是一个平行四边形,该平行四边形的面积就是 DBD 等离子体在一个周期内的功率损耗.不仅如此,由于 $q - V$ 图形的几何参数与 DBD 装置的物理结构及运行状态密切相关,因此还可以得出放电间隙等效电容、电介质层等效电容、着火电压、间隙电压、峰值电压及放电间隙电场强度、折合电场强度等放电参量,并根据 $q - V$ 图形随工作条件及状态的变化还可以判断 DBD 等离子体的工作稳定性及其变化规律.将高压电桥应用到 $q - V$ 图形测量电路中,可以更方便地获得放电装置的有效功率.

2 电荷电压法测量 DBD 等离子体放电参量的原理

DBD 是将电介质绝缘材料插入放电空间的一种气体放电,介质可以覆盖在电极上或悬挂在放电空间里^[10,11].根据介质阻挡放电装置的物理结构可知,介质阻挡放电装置实际上是由放电电极、电介质层、放电间隙构成的有损耗电容器,对激励电源来说可等效为阻容性负载.图 1(a)为介质阻挡放电装置的等效电路图.其中 C_g 为放电间隙等效电容, C_s 为电介质层等效电容, V 为放电间隙等效电压.如果在 DBD 装置上施加的电压为正弦波,如图 1(b)所示,在低频情况下,激励电压的一个周期可分为 $A - B$, $B - C$, $C - D$, $D - E$ 四个工作阶段.在通常条件下,DBD 是由大量微放电脉冲组成的,这些微放电脉冲会叠加到 DBD 装置的工作电流上引起工作电流的畸变.因此,利用电流电压波形测量 DBD 放电参量是十分困难的.如果在放电装置的接地端串入一只无损耗测量电容器,利用电容的积分特性就可以将包含大量微放电电流脉冲的电流波形转换成电容器上平滑的电压波形,将该电容器上的电压信号与激励电压信号同时送到示波器的 X, Y 端子上,将得到一个平行四边形如图 1(c)所示,其四条边分别对应于图 1(b)的四个阶段.其中 $A - B$, $C - D$ 为微放电发生阶段.在这一阶段内,微放电的数量随激励电压和频率的增加从几 kHz 扩展到几 MHz.这些数量庞大的微放电脉冲均匀地分布于整个放电空间内,其集体效应的结果是在宏观上表现出明显的齐纳二极管效应,即放电间隙内的等效电压保持恒定. $B - C$, $D - A$ 为微放电截止阶段,在该阶段内反向电流为电介质电容充电,在电介质表面积累大量电荷从而为下半周期的微放电积累能量. A, C 两点为微放电截

止到发生的临界电压值(着火电压) B, D 两点为微放电发生到截止的转换电压,其值为外加电压的正、负峰值.

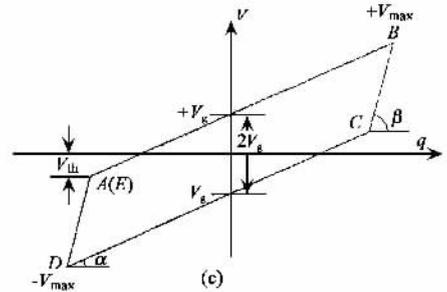
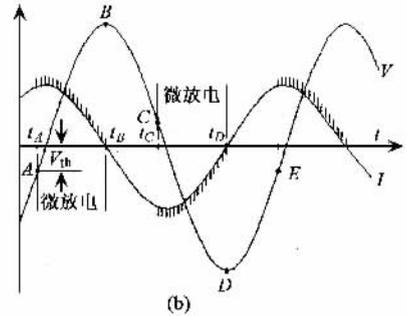
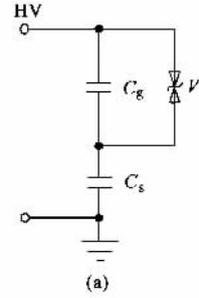


图 1 DBD 等效电路及放电参量
(a)DBD 等效电路 (b)电压电流波形图 (c) $q - V$ 波形图

假设在 DBD 装置上施加的激励电压为

$$V_t = V_m \sin(\omega t + \phi), \quad (1)$$

根据图 1(a)所示的 DBD 等效电路,在 AB, CD 放电阶段内,放电间隙等效电压 V_g 保持恒定,因此可以导出 AB, CD 阶段的 $q(t) - V(t)$ 方程为

$$AB \text{ 阶段} \quad V_t = \frac{1}{C_s} q(t) + V_g, \quad (2)$$

$$CD \text{ 阶段} \quad V_t = \frac{1}{C_s} q(t) - V_g. \quad (3)$$

在 BC, DE 非放电阶段,放电间隙等效电压 V_g 不再保持恒定,而是由 C_s 与 C_g 组成的串联电路的分压决定,因此可以导出 BC, DE 阶段的 $q(t) - V(t)$ 方程为

BC 阶段

$$V_1 = \frac{C_s + C_g}{C_g C_s} q(t) + \left[\left(1 + \frac{C_s}{C_g} \right) \cdot V_g - \frac{C_s}{C_s} V_m \right], \quad (4)$$

DE 阶段

$$V_1 = \frac{C_s + C_g}{C_g C_s} q(t) - \left[\left(1 + \frac{C_s}{C_g} \right) \cdot V_g - \frac{C_s}{C_g} V_m \right] \quad (5)$$

根据(2)~(5)式可知, AB, CD 阶段的 $q(t) - V(t)$ 方程是斜率为 $1/C_s$ 的平行直线, BC, DE 阶段是斜率为 $\frac{C_s + C_g}{C_g C_s}$ 的平行直线. 因此, 由这四条直线围成的四边形是一个平行四边形. 由(2)式、(3)式之差还可得在任一电量时, 两电压差值为 $2V_g$, 也就是说 AB, CD 两条直线是由 $2V_g$ 分开的.

由于 DBD 放电是在 C, A 两点转换, 可由(3)式、(4)式求得放电起始电压为

$$V_{th} = V_m - 2 \frac{(C_g + C_s)}{C_s} V_g. \quad (6)$$

根据电路理论, 介质阻挡放电的功率由(7)式给出:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_A}^{t_E} u(t) i(t) dt = \int_{t_A}^{t_E} u(t) dq(t). \quad (7)$$

由(7)式可以看出, 平行四边形的面积等于一个周期内 DBD 的能量消耗. 由于该功率消耗只发生在微放电阶段内, (7)式又可写为

$$P = \frac{2V_g}{T} \cdot q_{AB} = \frac{2V_g}{T} \cdot C_s (V_{max} + V_{th}),$$

整理得 DBD 放电功率计算公式

$$P = 4fV_g C_s \left[V_m - V_g \left(\frac{C_g + C_s}{C_s} \right) \right] \quad (8)$$

从以上的推导可以看出, 利用 $q - V$ 图形可以得出放电间隙等效电压、放电间隙等效电容、电介质层等效电容和放电功率等许多表征 DBD 集体效应的放电参量.

然而, 由 $q - V$ 图形所得出的放电功率只是 DBD 装置的视在功率. 由于放电间隙存在等效电容 C_g , DBD 发生放电时必然有一部分电流以位移电流的形式通过 C_g , 该电流在气体放电中并不引起功率消耗, 因此(8)式计算的结果实际上是放电装置的视在功率. 要准确测量 DBD 装置的有效功率, 必须排除 C_g 的影响.

排除 C_g 影响最好的方法是将高压电桥引入到测量电路中. 同 $q - V$ 图形法相比, 该法只是在测量电路中增加一只参考臂和一个信号隔离变压器. 测量时首先在负载产生放电之前将电桥调节平衡, 然后再提高电压直至工作电压, 这时就会在放电间隙内产生气体放电, 打破电桥的平衡, 产生不平衡电

压, 将该电压及负载两端的电压分别送到示波器的 Y, X 输入端, 就会在示波器上产生一个上下对边平行于坐标轴的平行四边形. 该平行四边形的面积就是每周期的放电能耗, 因此可以利用平行四边形面积计算方法简单地求得每周期的能耗及有效功率:

$$W = AS_x S_y, \quad (9)$$

$$P_o = fW = fAS_x S_y, \quad (10)$$

其中 W 为每周期的能耗, 单位为焦耳; P_o 为放电功率, 单位为 W; f 为电源频率, 单位为 Hz; A 为平行四边形的面积, 单位为 cm^2 ; S_x 为水平轴偏转灵敏度, 单位为 V/cm ; S_y 为垂直轴偏转灵敏度, 单位为 C/cm .

从原理上看, 高压电桥法测量放电功率的原理与 $q - V$ 图形法相同, 都是利用测量一个周期内通过电容器的电荷量来反映放电的功率消耗, 所不同的是 $q - V$ 图形包含了间隙电容 C_g 的影响, 反映的是视在功率, 而高压电桥法利用电桥的平衡原理排除了间隙电容 C_g 的影响, 因此测得的是真正用于放电功率消耗的有效功率.

3 测量系统

用于 DBD 放电参量测量的实验系统如图 2 所示. 图 2(a) 为 $q - V$ 图形测量系统. 该方法是在放电装置的接地端串入一只无损耗的电容器, 并将该电容器上的电压信号与电压分压器获得的激励电压信号同时送到示波器的 X, Y 输入端, 这样就在示波器上获得了反映 DBD 放电参量的 $q - V$ 图形. 图 2(b) 为电桥法测量系统, 同 $q - V$ 图形法相比仅仅增加了一只由测量电容组成的参考臂和一只用于信号隔离的变压器. 经过改进后的测量系统有效地排除了放电间隙等效电容的影响, 因此测量的是有效功率. 本文实验中使用的相关设备仪器有: 高频激励电源 (大连海事大学研制生产的 GGD - A3 型高压逆变电源, 主要参数为输入电压 AC 0—220V, 最高输出峰值电压 20kV, 工作频率为 5—20kHz 可调, 输出波形为正弦波), DBD 装置 (大连海事大学研制的 BGQ - C4.1 - 80 型标准臭氧发生器), 高压脉冲分压器 (日本 IWATSU 生产的 HV - 60 型高压分压器, 其主要参数为使用频率 DC ~ 50MHz, 最大直流测量电压为 DC60kV, 变比 2000:1), 示波器 (日本 IWATSU 生产的 DS - 8608A 型数字存储示波器, 其频率特性为

DC ~ 100MHz), 无损耗标准电容 ($\tan\delta < 0.0001$), 隔离脉冲信号变压器 (自制, 变比 1: 1.026).

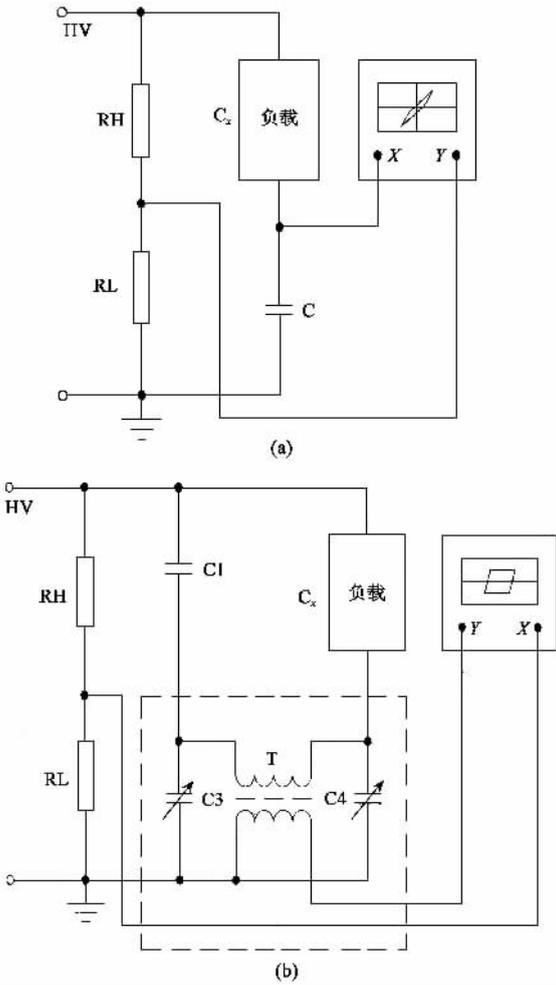


图2 放电参量测量实验系统
(a) $q-V$ 图形测量系统 (b) 电桥法测量系统

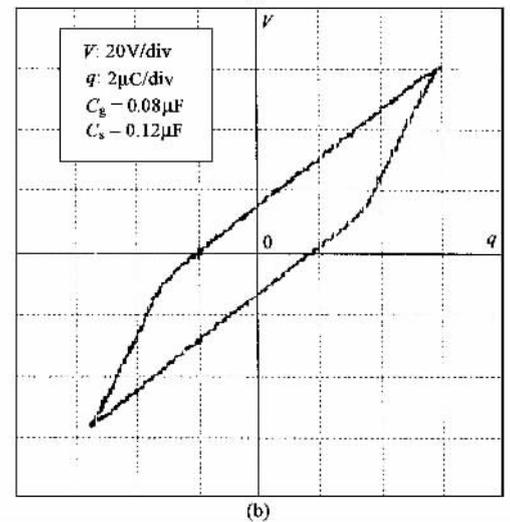
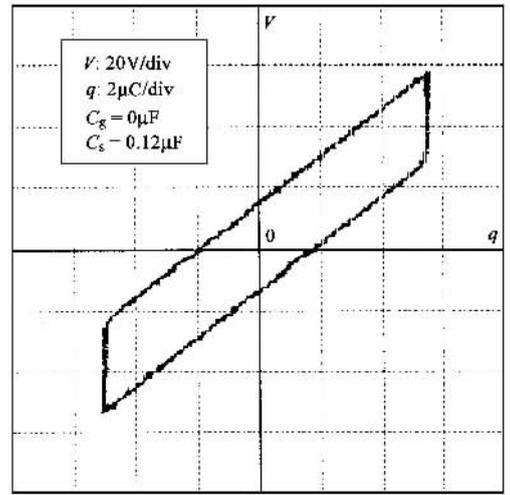


图3 齐纳二极管模拟等效 $q-V$ 图形
(a) $C_g = 0\mu F$ (b) $C_g = 0.08\mu F$

表1 利用模拟等效 $q-V$ 图形所得参量与实际值的比较

	图3(a)		图3(b)	
	测量值	实际值	测量值	实际值
V_{max}/V	57.56	60.00	60.06	60.00
V_g/V	14.66	15.00	15.02	15.00
V_{th}/V	28.60	30.00	12.51	10.00
$C_g/\mu F$	0.00	0.00	0.08	0.08
$C_s/\mu F$	0.12	0.12	0.13	0.12
$W / (\times 10^{-6} J)$	307.86	324.00	266.06	252.00

4 测量结果比较

4.1 齐纳二极管等效电路模拟实验

为了更好地说明 $q-V$ 图形与 DBD 等离子体各放电参量的关系, 用已知参数的元件按图 1(a) 搭建了一个等效电路模型, 其中电容 C_g 为 $0.08\mu F$, C_s 为 $0.12\mu F$, 齐纳二极管为 15V. 激励电源频率为 5kHz. 利用 $q-V$ 图形法测量齐纳二极管的功耗所得的波形如图 3 所示. 图 3(a) 为 $C_g = 0$ 时的图形, 图 3(b) 为 $C_g = 0.08\mu F$ 时的图形, 其余各参数均相同. 对图 3 的分析结果见表 1. 通过对比可以看出, 通过 $q-V$ 图形得到的各参量与实际值相符, 说明利用 $q-V$ 图形法测量 DBD 等离子体放电参量是可行的.

4.2 两种测量方法的比较

图 4 是根据图 2 所示实验系统在 10kHz 条件下获得的电压电流波形图及 $q-V$ 图形. 从电流波形图可以看出, DBD 装置放电发生阶段含有几 MHz 的电流脉冲, 这些电流脉冲是由于放电间隙内大量的微放电形成的. 因此, 试图用 $V-I$ 法测量放电功率是

不可行的. 同理想的 $q-V$ 图形相比, 图 4(b) 所示的 $q-V$ 图形的着火电压 V_{th} 并不明显, 这主要是由于在频率相对较高时放电间隙的齐纳特性非理想化造成的, 同 DBD 实际工作状态是一致的. 这并不影响对主要放电参数的测量.

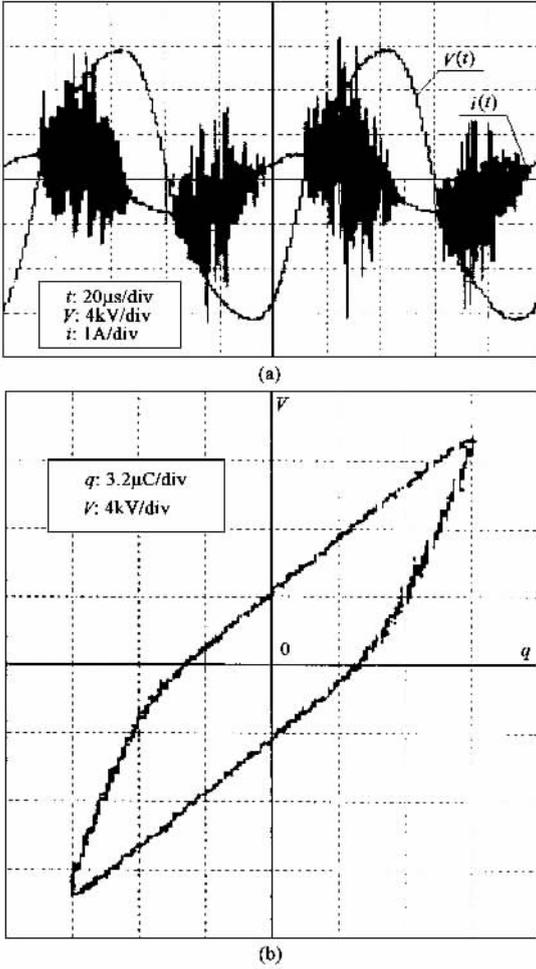


图 4 (a) 典型的 $i(t)$ 与 $V(t)$ 波形图 (b) $q-V$ 图形

图 5 是在 10kHz 几种不同激励电压条件下利用高压电桥法测得的典型波形图. 由于排除了放电间隙等效电容 C_g 的影响, 该方法测得的是 DBD 装置的有效功率. 根据这些图形可以看出, 在较低频率条件下 (通常 $f < 几十 kHz$), 间隙内发生气体放电前的波形图为一 条 直 线, 表 明 没 有 功 率 消 耗; 间 隙 内 发 生 气 体 放 电 后 的 波 形 图 为 上 下 对 边 平 行 于 横 轴 的 平 行 四 边 形, 表 明 负 载 发 生 功 率 消 耗. 这 个 平 行 四 边 形 的 面 积 就 是 每 周 期 的 能 量 消 耗. 实 际 上, 高 压 电 桥 法 测 量 介 质 阻 挡 放 电 功 率 是 $q-V$ 图 形 法 的 一 种 扩 展, 可 以 理 解 为 C_g 等 于 零 的 一 种 特 例 (见 图 3), 但 在 测 量 时 却 方 便 很 多.

图 6 是在激励频率为 10kHz 时, 利用功率表法、

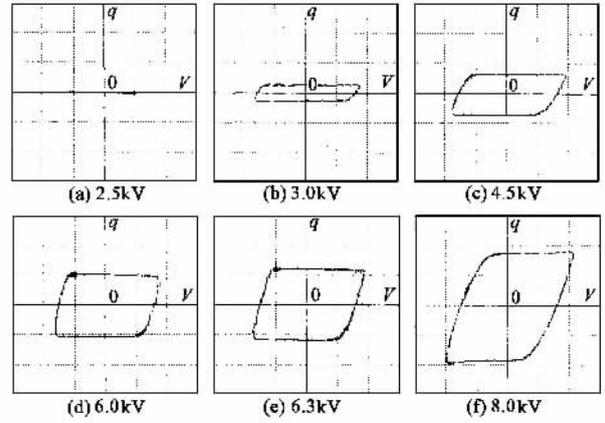


图 5 高压电桥法测得的典型 $q-V$ 图形 ($V: 4kV/div$, $q: 3.2\mu C/div$; $f = 10kHz$)

高压电桥法和 $q-V$ 图形法测得的放电功率随不同激励电压变化的情况. 图 7 是在不同激励频率条件下, 三种功率测量方法测量结果比较图. 可以看出, 无论是在不同激励电压下还是在不同激励频率下, 对放电功率测量的结果总是功率表法最大, $q-V$ 图形法次之, 高压电桥法最小. 这是因为功率表法测量时包含了逆变变压器的损耗, 随着工作频率的增加该损耗也增加, 而 $q-V$ 图形法测量的是放电装置的视在功率, 高压电桥法测量的则是放电装置的有效功率.

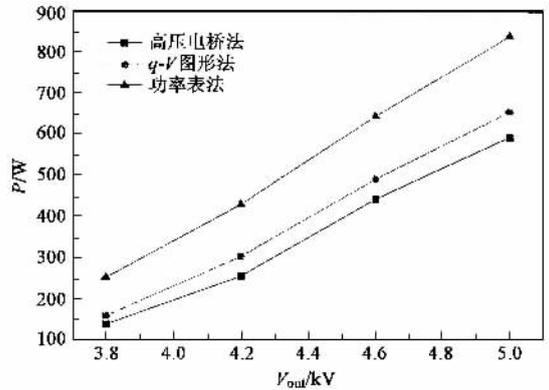


图 6 放电功率与激励电压关系图

5 结论

(1) 使用 $q-V$ 图形法及高压电桥法可以获得与 DBD 等离子体相关的放电间隙等效电压 V_g 、着火电压 V_{th} 、放电间隙等效电容 C_g 、电介质层等效电容 C_s 、视在功率 P 、有效功率 P_e 等放电参量, 这些参量对评价 DBD 等离子体是至关重要的. 根据这些参量并结合气隙间距、工作气体密度等有关物理参数还可以导出放电间隙的电场强度、折合电场强度等参

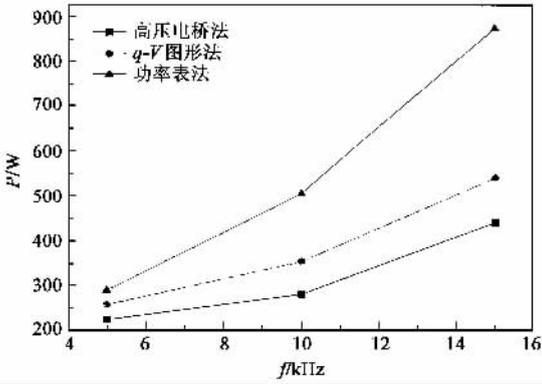


图7 放电功率与激励频率关系图

量及其随时间的变化规律。

(2) 由于 $q-V$ 图形的几何参数与 DBD 等离子体的工作状态密切相关, DBD 装置工作条件及状态的任何变化都会反映到该图形上, 因此可以使用该方法作为一种动态的监测手段。

(3) 本文实验是在电源激励频率小于 15kHz 条件下得出的结论, 电源工作频率越低, 所得的平行四边形越理想, 而当频率高于几十 kHz 时, $q-V$ 图形会逐渐变成一个椭圆。这是由于在高频情况下, 放电

间隙电压不能再用齐纳二极管等效, 但该几何图形仍然反映一定的放电参量。

参 考 文 献

[1] Yagi S, Kuzumoto M. Aust. J. Phys., 1995, 48 #11
 [2] Kunhardt E E. IEEE Trans. Plasma Sci., 2000, 28 :189
 [3] Eliasson B, Kogelschatz U. IEEE Trans. Plasma Sci., 1991, 19 :1063
 [4] 白希尧, 张芝涛, 白敏药等. 自然杂志, 2000, 22 347 [Bai X Y, Zhang Z T, Bai M D et al. Ziran Zazhi, 2000, 22 347 (in Chinese)]
 [5] Masaki Kuzumoto. Energy and Resources, 1999, 20 #35
 [6] Deryugin A, Napartovich A, Gorse C. Plasmas Chemistry and Plasma Processing, 1997, 17 79
 [7] Rosenthal L A, Davis D A. IEEE Trans. Ind. Application, 1975, IA-11 328
 [8] Bartnikas R. IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation, 1987, DEI-22 629
 [9] Masaki Kuzumoto, Yoichiro Tabata, Kenji Yoshizawa et al. T. IEE Japan, 1996, 116-A :121
 [10] Murata T, Tatsukawa M, Okita Y et al. Ozone Sci. Eng., 1995, 17 575
 [11] Eliasson B, Hirth M, Kogelschatz U. J. Phys. D: Appl. Phys., 1987, 20 :1421



· 读者与编者 ·

读者来信

《物理》编辑部：

您好！我是山东大学 2000 级物理系学生，对物理理论很感兴趣。我校阅览室有贵《物理》杂志，自上学期接触到后，我每刊必读，并深深地喜欢上了《物理》，坚持看完每一篇文章。我觉得从中能看到各位老师的深刻思想和治学作风。感谢《物理》陪伴了我一年的大学时光，感谢你们编辑了这么优秀的杂志。

对《物理》里的“粒子诗抄”栏目，我也非常喜欢。当看其他文章看得有点累时，我会在“粒子诗抄”里休息一下，欣赏一下大师们的情趣、智慧和风采。受到这么多美妙小诗的感染，我自己也仿着写一些。例如我送同学一本散文集《尘世乃唯一的天堂》时，写了一首：

生有异能难度量，
 日夜勤炼真火旺，
 快马追光非神助，
 乐把物理解天堂。

一、二、三句分别写孙悟空、太上老君、白龙马，也是写原子能和测不准原理、反应堆、相对论。当然，这些联系很是牵强。其实，我是要把一个“勤”字写出来。我很佩服我同学的勤奋，本想用四句话来隐括一个“勤”字，但最后还是觉得把它写出来要好。无论干什么（包括物理学习），我们都不可迷信天分，而要相信勤奋，相信只有勤奋才能踏平坎坷路！

谢谢老师！

学生：肖文峰
 2003 年 5 月 20 日



更 正

本刊 2003 年第 2 期第 126 页右栏第 22 行至 24 行中的“（见《物理》2001 年第 7 期第 392 页；高温超导薄膜无源微波器件的应用）”应更正为“（见 Materials Science & Engineering, 2000 年第 29 卷第 153 页）和一篇关于高温超导无源微波器件应用的评述文章（见《物理》2001 年第 7 期第 392 页）”。

《物理》编辑部