

# 用 PET 薄膜覆盖金属丝网电极实现 大气压空气中均匀放电<sup>\*</sup>

罗海云<sup>1)†</sup> 王新新<sup>1)</sup> 毛 婷<sup>2)</sup> 梁 卓<sup>2)</sup> 吕 博<sup>1)</sup> 关志成<sup>2)</sup> 王黎明<sup>2)</sup>

1) 清华大学电机系, 北京 100084)

2) 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055)

(2007 年 9 月 22 日收到, 2007 年 10 月 17 日收到修改稿)

将 325# 不锈钢丝网电极和 0.1 mm 厚的 PET 薄膜紧贴在一起, 平整地固定在 Rogowski 电极基座上, 用 50 Hz 工频电压源及并联稳压电容, 在大气压下 2 mm 空气间隙中实现了均匀放电. 实验表明, 将放电电流和电荷量波形作为判断放电均匀性的依据并不是完全可靠的, 它只能判断放电在时间上的一致性, 而不足以判断放电在空间上的均匀性. 只有拍摄曝光时间不大于 100 ns 的放电图像, 才能可靠地判断放电的均匀性. 在金属丝网电极覆盖 PET 薄膜的大气压气体放电实验中, 这种放电图像被拍摄到, 并说明大气压空气中的均匀放电只是汤森放电, 而非辉光放电.

关键词: 大气压辉光放电, 金属丝网电极, 驻极体, 高速摄影

PACC: 5280H, 5150, 5270K

## 1. 引 言

介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)是产生大气压低温等离子体的有效方法, 是近年来研究的热点<sup>[1-5]</sup>. DBD 等离子体常常被用来进行材料表面改性, 但大气压空气中的 DBD 通常表现为在时空上随机分布的大量放电细丝, 这种放电的不均匀性将导致表面处理的不均匀, 甚至损坏试品.

由于其诱人的工业化应用前景, 在大气压空气中产生均匀的 DBD 等离子体一直是研究的热点. 为此, 人们提出了一些方法, 其中包括 Okazaki 等人采用的聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)薄膜覆盖金属丝网电极的方法<sup>[3]</sup>. 1993 年 Okazaki 用金属丝网作为电极, 用 PET 等驻极体材料薄膜作为阻挡介质, 使用工频电压, 分别在大气压氩气、氮气和空气中实现了均匀放电, 并提出了用电流波形和利萨如图一起作为鉴别是否辉光放电的依据. 自此以后, 一些研究小组也采用 PET 薄膜覆盖丝网电极的方法, 并尝试对其实现均匀放电的机理进行解释. Tepper 等人用类似方法研究了大

气压氩气中的放电过程, 并拍摄了均匀放电和非均匀放电的图像(曝光时间 1 ms)<sup>[4]</sup>. Golubovskii 结合 Tepper 的实验结果, 数值模拟了放电过程, 并对驻极体薄膜在均匀放电中的作用作了解释<sup>[5]</sup>. 驻极体材料保存电荷的能力很强, 使得在上一个放电脉冲期间吸附在驻极体薄膜表面的电子有可能保留下来, 成为下一个放电脉冲的种子电子. 对于丝网电极在实现均匀放电中所起的作用, 人们有不同的解释. Buchta 等人认为<sup>[6]</sup>, 相对于一般的平板金属电极, 丝网电极的电阻较高, 可能抑制了放电向流注细丝发展. 方志实验研究并拍摄了 2 mm 大气压空气间隙中的均匀放电和非均匀放电的图像(曝光时间 50 ms)并认为击穿前丝网电极电晕使大量电荷注入 PET 薄膜, 它们在薄膜的另一面释放到气体间隙中成为放电的种子电子, 这可能是导致均匀放电的原因<sup>[7]</sup>. 通过电场计算, 并结合实验结果, 我们认为<sup>[8]</sup>丝网电极使得气体间隙中紧挨 PET 薄膜处由于局部电场增强而产生电晕, 为均匀放电提供了大量的种子电子.

在我们前期工作的基础上<sup>[8]</sup>, 本文继续采用 PET 薄膜覆盖金属丝网电极的方法, 对大气压空气

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点项目(批准号 50537020)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号 20040003011)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: Robertluo1982@gmail.com

放电进行了更深入地研究.为了进一步提高气体间隙中紧挨 PET 薄膜处的局部电场,以利于在更低电压下电晕,我们改进了丝网电极和 PET 薄膜的安装方式,使丝网和薄膜平整而紧密地固定在作为电极基座的 Rogowski 电极上<sup>[9]</sup>.用高速 ICCD 相机拍摄的放电图像(曝光时间 10 ns—1 μs)表明:改进后放电确实更加均匀了.由于放电细丝的寿命通常为几十 ns,以前人们用 1 ms—50 ms 曝光时间拍摄的放电图像并不能真实地反映放电的均匀性,而可能是不同时间出现的放电细丝图像的叠加.因此,在丝网电极覆盖 PET 薄膜的放电研究中,本文第一次为人们提供了能够真实地反映放电均匀性的图像.

## 2. 实验布置

图 1 为实验中采用的实验装置及其电气接线示意图.采用 50 Hz 的工频电压,经过调压器  $T_1$  和升压变压器  $T_2$  将高电压施加到气体间隙两端的电极上.为了达到稳定放电的目的,高压电源的输出端并联了稳压电容  $C_{\text{add}}$ ,在电源高压端和电极之间串联了限流电阻  $R_{\text{add}}$ ,以保护电源.实验时的外加电压由电阻分压器(变比 870)测量; $R$  为 1.1 Ω 的无感电阻, $C$  为 40 nF 的采样电容,通过切换开关  $K_1$  和  $K_2$ ,以测量放电电流和电荷量.各种电信号的测量选用美国惠普公司的 4 通道(如图 1 中  $\text{Ch}_1$  至  $\text{Ch}_4$ )数字存储示波器,型号为 HP54512B.

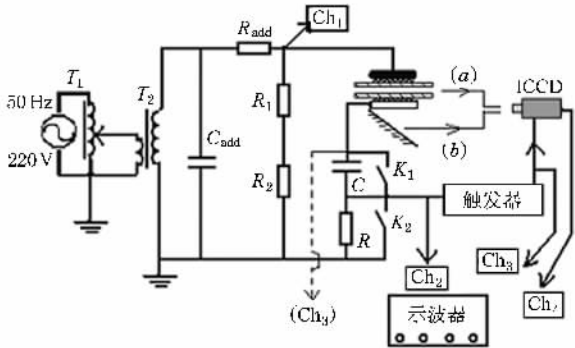


图 1 实验布置示意图

正确地设计、安装电极系统(金属丝网及其基座、PET 薄膜)对实现均匀放电是至关重要的.金属丝网电极和覆盖在丝网上的 PET 薄膜都是柔软之物,必须有电极基座支撑,才可能使它们保持平整.如图 1 所示,我们实验中的上下两个电极是丝网电极放置于电极基座之上,然后在丝网电极之上覆盖

PET 薄膜.丝网电极直径 4 cm,由 325#(325 丝数每英寸,细丝直径 0.035 mm)不锈钢丝网构成.为了使气体间隙中电场径向分布尽可能均匀,我们摒弃了电极基座边缘倒圆角的方法,而采用气体激光器领域常用的 Rogowski 电极作为电极基座,电极基座外径为 6 cm.电场计算表明:采用 Rogowski 电极基座后,气体间隙径向边缘处电场仅比轴线处高 3%,远低于普通带倒角的圆电极边缘电场的 11% 增加量.为了使该薄膜和丝网电极紧密接触,使用了聚氯乙烯套环将丝网和薄膜一起平整而紧密地固定在电极基座上(见图 2).

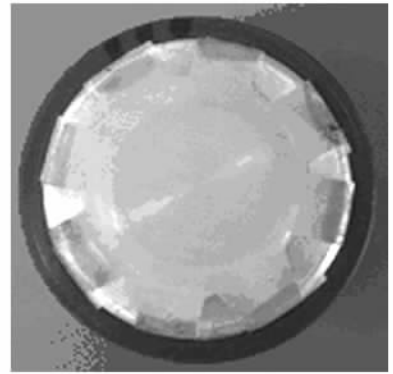


图 2 PET 薄膜和丝网电极被聚氯乙烯套环固定在电极基座上

为了拍摄 2 mm 大气压空气间隙中的放电图像,我们选用美国 PI 公司的 ICCD 高速相机(PIMAX2:1003RB),其最短曝光时间为 2 ns,可以满足拍摄寿命仅几十 ns 的单个放电细丝发展过程的高时间分辨要求.当 ICCD 沿图 1 中(a)方向拍摄时,可以得到放电的侧面图像.为了拍摄放电的底面图像,我们选用透明的有机玻璃加工成电极基座,在基座下方 45°方向放置全反射镜,如图 1 所示,ICCD 沿(b)方向拍摄.为了在放电的不同时刻拍摄放电图像,我们设计了一个触发器,它被放电电流的采样电压触发后,将输出一个触发信号到 ICCD 控制器,经过一个预先设置的延时后,开启 ICCD 快门.

## 3. 实验结果及讨论

### 3.1. 电特性

根据气体放电理论,均匀放电包括汤森放电和辉光放电两种形式.丝状放电属于另一种放电形式——流注放电,即使是大量的放电细丝貌似均匀地

分布在放电间隙中,它们仍不属于均匀放电.显然,判断放电均匀性的最直接方式是拍摄高时间分辨(曝光时间 100 ns 左右)的放电图像,以观察是否存在时空上随机分布的放电细丝.但是,由于这种高速 ICCD 相机的出现时间还不久并且价格昂贵,以往人们常常以放电电流及放电电荷的波形作为放电均匀性的间接判断依据.

在介质阻挡条件下,均匀放电的必要条件是在一个很短的时间范围内(0.1  $\mu\text{s}$  至 1  $\mu\text{s}$  数量级),放电在整个气体间隙中同时发生.因此,均匀放电在电流波形上的特征是在外加交变电压的每半个周期内,通常只出现一个半高宽为 0.1  $\mu\text{s}$  至 1  $\mu\text{s}$  数量级的电流脉冲.而非均匀放电是由大量在时空上随机分布的放电细丝组成的,它在电流波形上就表现为众多的半高宽为 10 ns 数量级的电流窄脉冲.与电流波形很好地相对应,放电电荷波形也是判断放电均匀性的一个依据.在外加电压的每半个周期内,均匀放电的电荷波形上通常只出现一个大的阶跃,而非均匀放电的电荷波形上将出现众多的小台阶. Okazaki 还提出将利萨如图作为判断放电均匀性的依据<sup>[3]</sup>.所谓利萨如图是将外加电压波形作为示波器 X 输入,电荷波形作为示波器 Y 输入,示波器屏幕上将出现一个闭合的准平行四边形,其上下两边对应一个外加电压周期内放电熄灭的时段,左右两边对应放电正在发生的时段.如果左右两边是几乎陡直上升,则意味着放电只持续非常的一个时段;如果左右两边缓慢地呈台阶状上升,则表明是大量细丝放电,即每一个放电细丝对应一个台阶.

图 3(a)是典型的放电波形图,其实验条件是丝网电极直径 4 cm, PET 薄膜厚度为 0.1 mm,大气压空气间隙 2 mm,  $C_{\text{ackl}}$  和  $R_{\text{ackl}}$  分别为 22 nF 和 5 k $\Omega$ .从图 3(a)可以看出,在每半个工频周期内只有一个电流脉冲.与之相对应,放电电荷波形上同时出现一个很陡的阶跃.图 4 是与图 3 对应的利萨如图,其左右两边呈陡直上升.文献 [8] 给出了我们前期实验得到的细丝放电的电流波形和利萨如图,它们与图 3 有显著的差别.显然,图 3 所示的放电很可能是均匀放电,这说明经过改进电极系统的设计和安装,使得放电的均匀性提高了.

值得指出的是,均匀放电的稳定性是和电源内阻抗以及并联电容  $C_{\text{ackl}}$  密切相关的.对于我们的电源和放电间隙而言,在现有的几个可供选择的  $C_{\text{ackl}}$  (0.5 nF—22 nF) 范围内,均匀放电的稳定性随  $C_{\text{ackl}}$

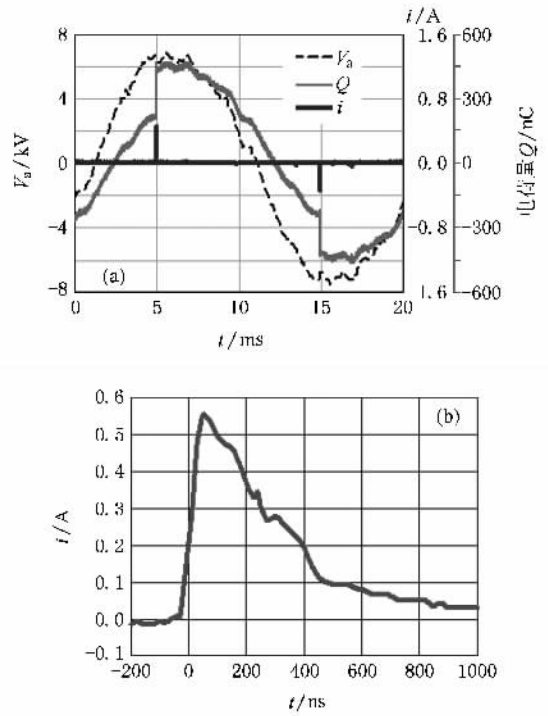


图 3 典型的放电波形图

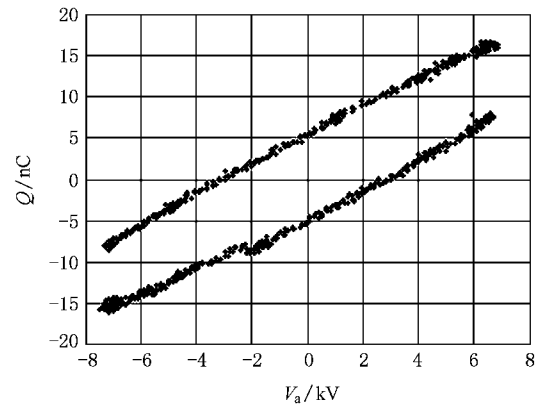


图 4 与图 3 对应的利萨如图

的增大而有所提高.至于限流电阻  $R_{\text{ackl}}$ ,则完全是为了保护电源而加上,它和提高均匀放电的稳定性无关,甚至有不利的影 响.如果将  $C_{\text{ackl}}$  和  $R_{\text{ackl}}$  看成是电源内阻抗的一部分,  $C_{\text{ackl}}$  减小了电源的内阻抗,而  $R_{\text{ackl}}$  增大了电源的内阻抗.电源内阻抗对放电有重要影响,这个规律并不是本文的放电所特有的.在研究气体放电管的伏安特性时<sup>[10]</sup>,人们发现气体击穿后,依据放电电流的大小,伏安特性曲线上可划分为汤森放电、正常辉光放电、反常辉光放电、电弧几个区间.而放电工作在上述那一个区间,决定于负载曲

线和伏安特性曲线的交点,即放电的工作点.所谓的负载曲线,在数学上可表示为  $\epsilon = V + iZ$ ,其中  $\epsilon$  和  $Z$  分别为电源的电动势和内阻抗; $V$  和  $i$  分别为气体放电管的电压和电流.显然,电源的特性在很大程度上决定了气体放电管的放电形式,相似的规律在平板电极的介质阻挡放电中也起着重要作用<sup>[11]</sup>.

图 3(b)是对图 3(a)中电流波形沿时间轴的展开图,从该图可以看到,放电电流脉冲的幅值约为 0.55 A,半高宽约为 400 ns.实验中发现电流脉冲幅值和半高宽随  $C_{\text{add}}$  和  $R_{\text{add}}$  的不同而改变,其基本趋势是  $C_{\text{add}}$  大则电流半高宽也大; $R_{\text{add}}$  增大则电流脉冲幅值减小但半高宽增大.

### 3.2. 放电图像

实验中发现,对于均匀放电,由于光强较弱,曝光时间低于 50 ns 时,ICCD 相机拍摄的放电图像信噪比很差.因此,拍摄均匀放电图像时采用的最短曝光时间为 50 ns.对于细丝放电,由于每个放电丝都比较明亮,曝光时间可以短至 10 ns.

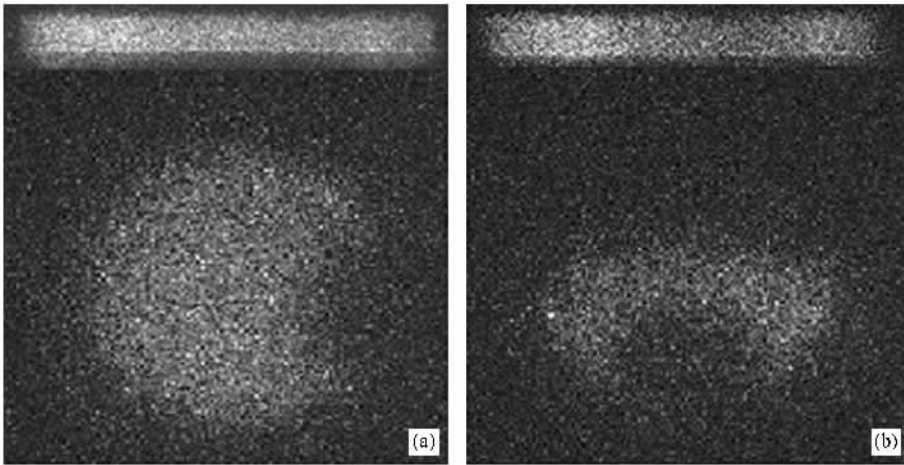


图 5 均匀放电图像 (a) 1  $\mu\text{s}$  (b) 100 ns

面,但间隙中不存在任何放电细丝,在这个含义上,可以认为放电属于均匀的汤森放电或辉光放电.因此,我们需要进一步分析图 5 放电的属性.根据辉光放电的实验和理论<sup>[10]</sup>,低气压辉光放电的最重要外观特征是从阴极至阳极,放电光强可粗略分为明暗相间的 3 个区间.它们依次是紧挨阴极的高强度发光的负辉光区、光强相对较弱的法拉第暗区,最后是光强适中的等离子体正柱区,正柱区一直延伸到阳极附近.大量实验表明大气压辉光放电也具备上述的外观特征<sup>[12]</sup>,图 6 是我们拍摄的大气压氦气辉光

前面提到,以往人们常常根据放电电流和电荷波形间接判断放电是否均匀.按照该判断方法,我们拍摄了一些均匀放电的图像,图 5 是其中之一.该图是在放电电流脉冲峰值时刻拍摄的,其上方是侧面图像,下方是底面图像.当曝光时间为 1  $\mu\text{s}$  时,从图 5(a)可以看到,放电基本上均匀地发生在整个气体间隙.当曝光时间为 100 ns 时,从图 5(b)可以看到,侧面图像的明暗已经不太均匀,而底面图像明显地反映出放电不是覆盖整个圆形电极表面的. Tepper 等<sup>[4]</sup>在相似电极结构的氦气放电实现的图像中,曝光时间为 1 ms 拍摄到的底面放电图像表明,放电虽然是覆盖整个电极区域但是明显有亮度的不同,他解释这是由于放电过程中电荷在薄膜表面上积累不均匀造成的.我们的实验却表明,如果丝网和薄膜的接触不是平整而紧密的,或者气体间隙长度略微不一致,将会导致整个气隙不同步击穿,或者某个区域始终不放电,而这种现象可能要在几十 ns 到几百 ns 级别才会发现.

尽管图 5(b)的放电没有覆盖整个圆形电极表

放电的图像(曝光时间 20 ns),下部是阴极,上部是阳极,其实验条件是不锈钢平板电极上覆盖石英玻璃.显然,图 6 中的放电图像具备以上描述的辉光放电的外观特征.反观图 5 中的侧面图像,我们看不到这些外观特征.因此,图 5 所示的放电属于汤森放电.



图 6 大气压氦气辉光放电图像

图 7 是用不同曝光时间拍摄的细丝放电图像,

其中(a)和(b)的上方是侧面图像,下方是底面图像;(c)和(d)只有侧面图像,并且图的上部是阳极,下部是阴极.从图中可以看到,相同实验条件下的细丝放电图像,细丝的数量及其分布的均匀度随着曝光时间的增大而增加.因此,对于细丝放电,长曝光时间

的图像或仅凭肉眼观察,可能给人造成均匀放电的假象(见图8).另外,从图7(c)和(d)可以观察到呈倒锥形(下细上粗)的放电细丝,这是由于电子雪崩从阴极向阳极发展过程中头部电子云因扩散而逐渐变粗的缘故.

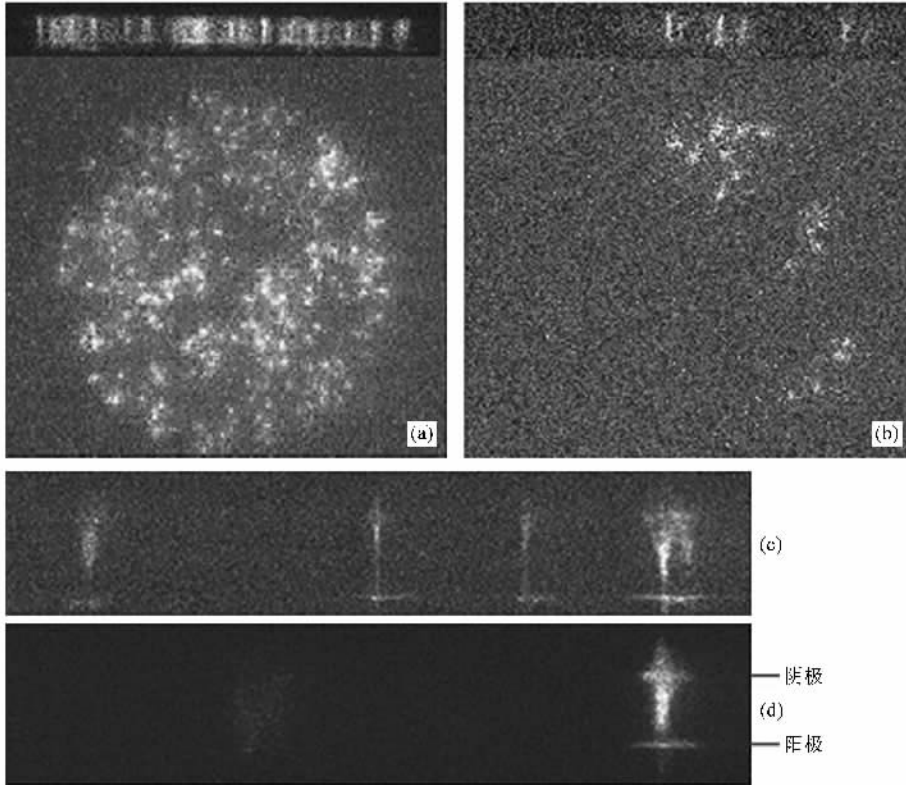


图7 丝状放电图像 (a)1 ms (b)100  $\mu$ s (c)100 ns (d)10 ns

## 4. 结 论

利用金属丝网电极覆盖 PET 薄膜的方法进行大气压空气放电实验时,必须使丝网和薄膜紧贴在一起并平整地固定在 Rogowski 电极基座上,这对于获得均匀放电是至关重要的.电源的内阻抗对放电有重要的影响,在电源输出端并联一个电容(其电容值远大于负载等效电容)有助于提高均匀放电的稳定性.

将放电电流和电荷量波形作为判断放电均匀性的依据并不是完全可靠的,它只能判断放电在时间上的一致性,而不足以判断放电在空间上的均匀性.只有拍摄曝光时间不大于 100ns 的放电图像,才能可靠地判断放电的均匀性.在金属丝网电极覆盖 PET 薄膜的大气压气体放电实验中,本文提供了这

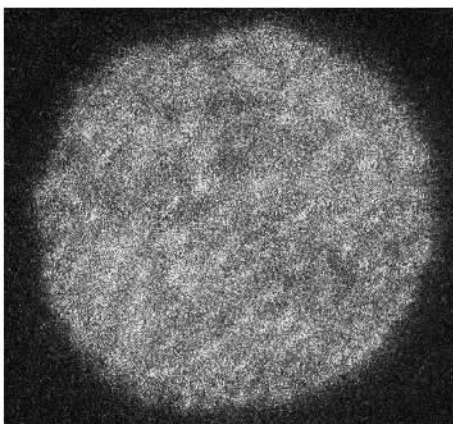


图8 曝光 100 ms 的丝状放电

种放电图像,并说明大气压空气中的均匀放电只是 汤森放电,而非辉光放电。

- [ 1 ] Wang Y H , Wang D Z 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 1295 ( in Chinese )  
[ 王艳辉、王德真 2005 物理学报 **54** 1295 ]
- [ 2 ] Dong L F , Ran J X , Mao Z G 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 2167 ( in Chinese )  
[ 董丽芳、冉俊霞、毛志国 2005 物理学报 **54** 2167 ]
- [ 3 ] Okazaki S , Kogoma M , Uehara M , Kimura Y 1993 *J . Phys . D : Appl . Phys .* **26** 889
- [ 4 ] Tepper J , Lindmayer M 2000 *HAKONE VII Intern . Symp . High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry* 38 - 43
- [ 5 ] Golubovskii Y B , Maiorov V A , Behnke J F , Tepper J , Lindmayer M 2004 *J . Phys . D : Appl . Phys .* **37** 1346
- [ 6 ] Buchta J , Brablec A , Trunec D 2000 *Czech . J . Phys .* **50** 273
- [ 7 ] Fang Z 2005 Doctor Dissertation ( Xi 'an Jiaotong University ) 34 ( in Chinese ) [ 方 志 2005 博士学位论文 ( 西安交通大学 ) 34 ]
- [ 8 ] Wang X X , Luo H Y , Liang Z , Mao T , Ma R L 2006 *Plasma Sources Science & Technology* **15** 845
- [ 9 ] Zhao X , Zuo D L , Lu H , Cheng Z H 2005 *Optics & Optoelectronic Technology* **3** 33 ( in Chinese ) [ 赵 翔、左都罗、卢 宏、程祖海 2005 光学与光电技术 **3** 33 ]
- [ 10 ] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* ( Berlin : Springer ) 172
- [ 11 ] Chen Z Y 2002 *IEEE Trans . Plasma Science* **30** 1922
- [ 12 ] Massines F , Ségur P , Gherardi N , Khamphan C , Ricard A 2003 *Surface and Coatings Technology* 174—175 8

## Realization of homogenous discharge at atmospheric pressure in air using wire mesh covered by PET films<sup>\*</sup>

Luo Hai-Yun<sup>1</sup>† Wang Xin-Xin<sup>1</sup> Mao Ting<sup>2</sup> Liang Zhuo<sup>2</sup> Lü Bo<sup>1</sup> Guan Zhi-Cheng<sup>2</sup> Wang Li-Ming<sup>2</sup>

1 † Department of Electrical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China )

2 † Shenzhen Graduate School , Tsinghua University , Shenzhen 518055 , China )

( Received 22 September 2007 ; revised manuscript received 17 October 2007 )

### Abstract

Homogenous discharges were produced in a 2-mm air gap at atmospheric pressure by using 325<sup>#</sup> fine wire mesh as electrodes covered with 0.1 mm PET films and 50 Hz line power source paralleled with a discharge-stabilizing capacitor. For obtaining such a homogeneous discharge it is important to attach tightly the wire mesh together with the PET film on the surface of a Rogowski electrode. The experiments show that the commonly used method to distinguish a homogenous discharge from a non-homogeneous one by the waveforms of discharge current and transferred charge is not always reliable since the waveforms could tell only the discharge simultaneity rather than the discharge homogeneity. A fast image of discharge with an exposure time not longer than 100 ns should be used instead to judge the discharge homogeneity. It is the first time in the experiments of atmospheric pressure discharge using wire mesh electrode covered by PET film such fast images were obtained , which indicates that the homogeneous discharge is a Townsend discharge rather than a glow discharge.

**Keywords :** atmospheric pressure glow discharge , wire mesh electrode , electret , fast imaging

**PACC :** 5280H , 5150 , 5270K

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China ( Grant No. 50537020 ) and by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20040003011 ).

† Corresponding author. E-mail : Robertluo1982@gmail.com