

不同电介质结构下介质阻挡放电特性研究*

董丽芳^{1)†} 杨玉杰¹⁾ 刘为远¹⁾ 岳 晗¹⁾ 王 帅¹⁾ 刘忠伟²⁾ 陈 强²⁾

1) (河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

2) (北京印刷学院等离子体物理材料实验室, 北京 102600)

(2010年3月30日收到; 2010年4月27日收到修改稿)

设计制作了单面有氧化锡(ITO)导电介质层的双玻璃介质层的介质阻挡放电装置,研究了其放电特性,并将其与双玻璃介质层和单玻璃介质层的介质阻挡放电进行了比较.从电荷输运的角度分析,上述三种装置分别实现了电荷的二维、零维和三维输运.采用两种不同的双玻璃介质层装置,获得了单个稳定的放电丝.与无ITO导电层的双玻璃结构得到的单个放电丝相比,单面有导电ITO介质的双玻璃结构中,单放电丝呈“T”字型,其光晕是前者光晕的2倍,其放电电流大于前者电流,其放电时间间隔长短交替现象更为明显,且存在强度大小交替的现象.分析表明,壁电荷输运及二次电子发射的不同导致了不同电介质结构放电特性的不同.

关键词: 介质阻挡放电, 壁电荷, 二次电子发射

PACS: 52.80.Pi, 52.20.-j

1. 引言

介质阻挡放电(DBD),又称无声放电,是一种典型的非平衡态交流气体放电.其装置通常是由两个平行电极组成,其中至少在一个电极表面覆盖上电介质^[1-4].目前,人们研究的DBD装置有很多,例如,单电介质DBD装置、双电介质DBD装置、半导体为电极的单电介质DBD装置以及针板DBD装置等^[5-20].

在高 pd 值的丝状放电中,当外加电压达到击穿阈值时,气体分子发生电离产生正负带电粒子.在外加场的作用下,在每一个放电通道内这些带电粒子分别向两极运动,并沉积在介质表面上,形成壁电荷.壁电荷产生内建电场,其方向与外加电场方向相反,因而作用在气体上的净电场为外加电场与内建电场之差.随着放电的进行,不断累积的壁电荷使内建电场强度很快增大,当净电场强度小于放电所需要的维持电场强度时,放电就熄灭了.但当下半周外加交流电压反向时,上述内建电场与外加电场同向,因而对放电起促进作用.因此,壁电荷对

放电具有双重作用.由于壁电荷的双重作用,使得介质阻挡放电出现放电时间间隔的长短交替现象^[17].

在介质阻挡放电中,不同材料的电极将影响电荷的输运情况.若一电极为导体,其对电荷输运没有任何限制,电荷在其中各个方向均能移动,既能沿电场方向输运返回回路,又能在垂直于电场的方向移动,我们称其实现了电荷的三维输运.如果电极上覆有电介质,电介质在沿电场方向和垂直电场方向上均限制电荷移动,电荷只能沉积并固定在介质表面,我们称其为零维电荷输运.如果以半导体作为电极,尽管半导体具有一定的电导特性,产生的电荷一部分输运返回回路,一部分会沉积在介质表面并在表面有一定扩散,其电荷在各个方向仍能输运,故我们仍称其为三维电荷输运.按照上述分析,可根据除覆有电介质的电极外另一个电极的材料结构,对已有的DBD装置进行分类如下:单电介质DBD装置,一电极由平板导体或半导体构成,我们称其为三维电荷输运DBD装置;双电介质DBD装置,两个电极上均覆盖有电介质,我们称其为零维电荷输运DBD装置;针板DBD装置,电荷只能沿

* 国家自然科学基金(批准号:10975043,10775037)、河北省自然科学基金(批准号:A2008000564, A2010000185)和北京市印刷包装材料与技术重点实验室开放课题(批准号:KF201006)资助的课题.

† E-mail: donglf@mail.hbu.edu.cn

针导体运输,我们称其为一维电荷运输 DBD 装置.

研究表明,不同的电荷运输将形成不同的介质阻挡放电特性. 例如,单电介质 DBD 特性与双电介质 DBD 特性不同;又如 Purwins 小组^[15-17]利用光敏的半导体硅(或半绝缘的 SI GaAs)作为电极,通过改变光照强度改变电极的电导率,发现放电中存在各种分岔现象及不稳定性,并认为是具有一定导电性的半导体介质层与气体放电层的电性耦合所致. 分析关于电荷运输的研究现状,发现以往的研究均集中在各向同性的电荷运输方面,尚未见过有关各向异性的电荷运输对放电特性影响的研究.

本工作首次设计制作了单面有氧化锡锡(ITO)导电介质层的双玻璃介质层的介质阻挡放电装置,这使得放电产生的电荷通过等离子体通道到达结构为 ITO 导电层-玻璃介质-液体电极的一侧时,尽管在电场方向上电荷运输仍被限制,但在垂直于电场的二维方向上电荷可自由移动,从而实现了电荷的二维运输. 显然,该装置实现了各向异性的电荷运输. 在此基础上,将其放电特性与双玻璃介质层和单玻璃介质层的介质阻挡放电特性进行了比较,并对电荷运输及二次电子发射对放电特性的影响进行了分析.

2. 实验装置

图 1 为三种不同介质结构的 DBD 装置示意图. 图中水电极是由装满水的内径为 30 mm 的圆柱形

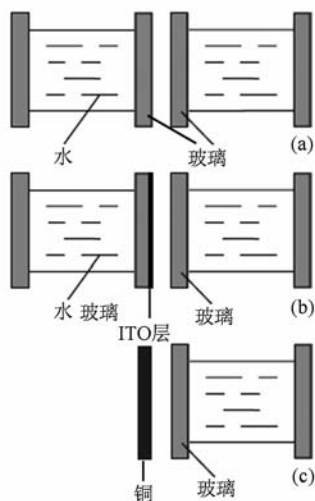


图 1 三种不同电介质结构的 DBD 装置示意图 (a) 双玻璃 DBD (零维电荷运输) 装置, (b) 有 ITO 导电层双玻璃 DBD (二维电荷运输) 装置, (c) 单玻璃 DBD (三维电荷运输) 装置

容器组成,与高压交流电源两极相连的金属环浸在水中. 容器的两端用厚度为 1.5 mm 的玻璃片封住,作为电介质. 从电荷运输的角度分析,如图 1(a)——(c)所示的三种装置,分别实现了电荷的零维、二维和三维运输. 图 2 为实验装置示意图. 反应室中分别放入图 1 所示的三种 DBD 装置,并充满氩气含量为 96% 的空气和氩气混合气体,气压控制在 1 atm ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$). 反应室两侧设有观察窗,用数码相机(Konica Minolta Dimage Z2)从端面拍摄放电丝的空间分布及运动变化过程. 使用频率为 60 kHz 的正弦交流电源,电压由高压探头(Tektronix P6015A 1000X)测得,并用数字示波器(Tektronix DPO4054, 500 MHz)记录、存储. 通过透镜系统可测量某一个或多个放电丝的光信号,由光电倍增管 PMT (RCA 7625)采集并由示波器记录.

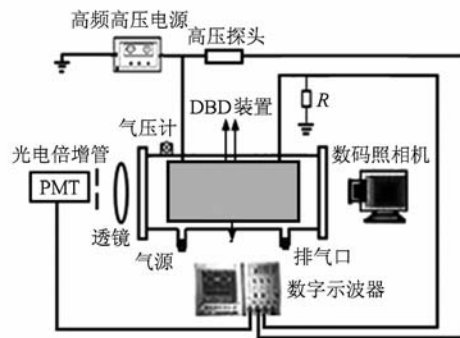


图 2 实验装置示意图

3. 实验结果与讨论

实验在双玻璃 DBD 和单面有 ITO 层的双玻璃 DBD 中得到了单个放电丝,如图 3 所示. 由上文可知,在单面有 ITO 层的 DBD 中,当气体电离产生的电荷到达具有导电性的 ITO 层时,将会在 ITO 中自由移动,那么其最终将分布在 ITO 与玻璃介质的界面处. 实验发现,在双玻璃 DBD 中得到的单放电丝稳定,而在有 ITO 层 DBD 中得到的单个放电丝通道直径比较大且有微弱的抖动,致使图 3(b)中放电通道直径明显比图 3(a)中放电通道直径大. 原因可能是在有 ITO 的一侧电荷的扩散,导致空间记忆效应减弱,从而引起放电通道的变大和放电位置的晃动. 由图 3 还可以看到,在双玻璃介质 DBD 中得到的单放电丝端面直径约为 3.3 mm,侧视图为“H”字型,这与以前的结果相同^[10];而在单面有 ITO 导电

介质层的 DBD 中得到的单放电丝端面直径约为 6.9 mm, 约为双玻璃中的 2 倍, 其侧视图为“T”字型 (有 ITO 层的一面光晕消失). 当气体电离产生的电荷在 ITO 中自由移动并分布在 ITO 与玻璃介质的交界面处时, ITO 表面没有和气体相互作用发光的粒子, 从而形成了单放电丝侧视图为“T”字型.

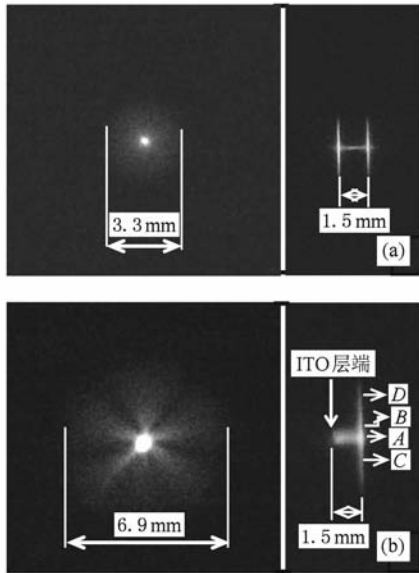


图3 不同电介质结构下得到的单放电丝(右列为侧视图)
(a) 双玻璃 DBD (装置参见图 1(a)) 得到的单放电丝, $U = 2.8$ kV; (b) 有 ITO 导电层双玻璃 DBD (装置参见图 1(b)) 得到的单放电丝, $U = 2.6$ kV

为了研究介质阻挡放电的电荷输运特性, 实验研究了三种不同结构的介质阻挡放电的电流特性, 结果如图 4, 图 5 和图 6 所示. 尽管外加电压依次减小 (分别为 2.8, 2.6, 2.2 kV), 但双玻璃 DBD, 有 ITO 导电层 (瞬时阳极时) 的双玻璃 DBD 及单玻璃介质 DBD (铜电极瞬时阳极时) 的放电电流却变大: 水电极为瞬时阳极时, 分别为 2.8, 12, 26 mA; 水电极为瞬时阴极时, 分别为 2.8, 14, 36 mA. 随电荷输运维数的减小, 介质对电荷的限制作用越来越大. 因此, 有 ITO 导电层的双玻璃 DBD 中放电电流大小处于双玻璃介质 DBD 和单层玻璃介质 DBD 的放电电流大小之间. 另外, 在后两种 DBD 装置中出现电流强度的大小交替现象, 这可能与介质的二次电子发射有关, 后文我们将对此进行分析.

图 4 和图 5 分别为在双玻璃 DBD, 有 ITO 导电层的双玻璃 DBD 两种不同介质结构下得到单放电丝放电的电压、电流以及光信号. 由图 4 可知, 在双玻璃介质中, 相邻两次放电的时间间隔为 8.57,

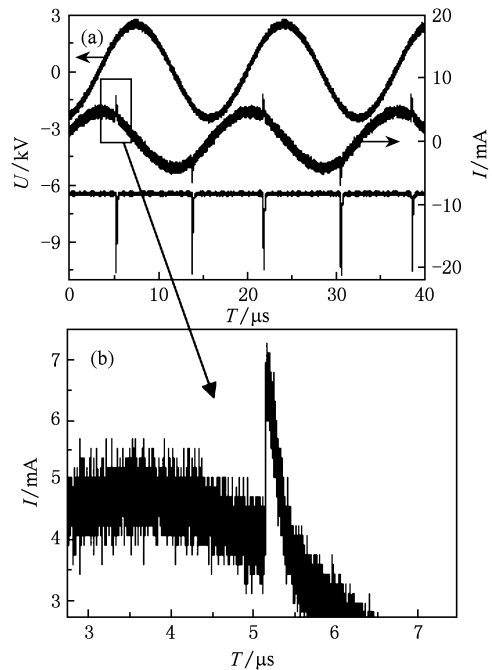


图4 双玻璃 DBD (装置参见图 1(a)) 中单放电丝的电压、电流及光信号波形 (a) 电压、电流及光信号波形 (底部曲线), (b) 电流信号的局部放大

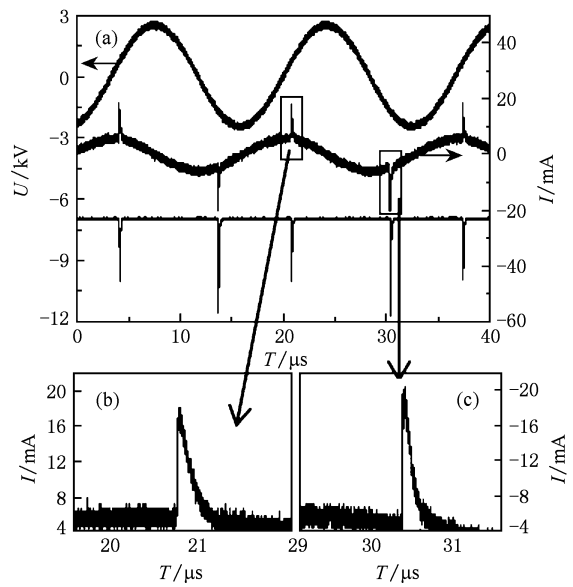


图5 有 ITO 导电层的双玻璃 DBD (装置参见图 1(b)) 中单放电丝的电压、电流及光信号波形 (a) 电压、电流及光信号波形 (底部曲线), (b) 电流信号的局部放大

8.01, 8.70, 7.98, ... μs , 可见是长短交替的, 长短之差约为 0.65 μs . 由图 5 可以看出: 1) 单层有 ITO 导电层的 DBD 中, 单放电丝放电时间间隔为 9.56, 7.11, 9.54, 7.09, ... μs , 放电时刻时间间隔也为长

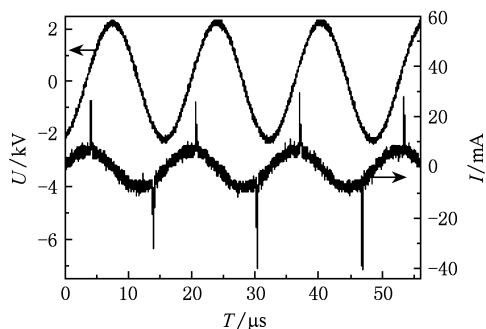


图6 单玻璃 DBD (装置参见图 1(c)) 中放电的电压及电流信号

短交替的,其长短之差约为 $1.44 \mu\text{s}$,因此长短交替现象更加剧烈;2)放电电流信号在每个放电周期内的上下半周大小不同,下半周(此时 ITO 导电层为瞬时阴极)比上半周约大 2.0 mA ,而在双玻璃 DBD 中放电电流大小没有变化;3)光信号脉冲强度与放电电流信号类似(上下半周大小不同),出现光信号强度上下半周大小交替现象,下半周与上半周之比约为 3:2,如同放电电流,双玻璃中没有这种现象。

由于两结构的 DBD 装置仅在 ITO 导电层的有无、不同介质放电形成的壁电荷分布不同,所以我们认为,造成放电间隔长短交替更加剧烈的原因为导电 ITO 层壁电荷分布的影响.由于 ITO 导电层的存在,壁电荷在 ITO 层上扩散,造成了壁电荷的面密度减小,影响到放电电场的大小,使得放电时刻改变,从而影响了放电丝放电间隔的长短交替现象的剧烈程度。

由以前研究可知,由于壁电荷的作用,上半周放电时刻越靠后,放电积累的壁电荷越多,下半周放电所需的外加电压越低,由此放电时刻越提前,这就造成了放电丝放电时间间隔的长短交替现象.研究发现,在介质阻挡放电中,微放电沿放电间隙的空间分布呈漏斗形,其颈部在阴极,开口在阳极^[19].因此,阴极的面电荷密度显然大于阳极的面电荷密度.由于内建电场的大小主要取决于电荷的面密度,所以内建电场的大小主要由瞬时阴极处积累的壁电荷面密度决定.在单面有 ITO 导电层的 DBD 中,壁电荷在 ITO 表面移动,使得有 ITO 导电层时壁电荷的面密度小于无 ITO 时(玻璃介质时)的面密度.这样,在有 ITO 导电层的一面为阴极时,使得上半周期留下的壁电荷产生内建电场比同样条件下玻璃中的要小,所以放电时刻向后延迟;同

时,放电时刻的向后延迟又使得放电积累的壁电荷变多,电极变换后(ITO 导电层的一面为阳极时,喇叭状开口由于 ITO 导电层存在而消失),放电所需的外加电压变低,放电时刻提前.因此这就造成了单面有 ITO 介质的 DBD 中产生的放电丝放电时间间隔的长短交替现象更加剧烈。

另外,ITO 介质层的存在使放电中出现二次电子发射现象,进而导致放电电流以及光信号强度在上下半周期呈现大小不同的特性.当用具有一定能量或速度的电子(或离子等其他粒子)轰击金属等物质时,也会引起电子从这些物体中发射出来,这种物理现象称为二次电子发射.带电粒子在轰击 ITO 导电层表面时出现二次电子发射,造成了放电电流及光信号强度在上下半周期大小交替的现象.另外,王德真小组通过数值模拟得到绝缘介质的二次电子发射会使放电电流增大^[13],这也是造成单面有 ITO 导电介质的双玻璃介质 DBD 放电电流变大的另一原因。

由于在有 ITO 导电层的双玻璃 DBD 中放电电流比较大,电子(或离子等其他粒子)的能量(动能)也就比较大,并且导电 ITO 对电子的束缚比玻璃差很多,这些离子轰击 ITO 导电层时就会产生二次电子发射.上述放电强度上(放电电流及光信号强度)的大小交替现象就是由于在 ITO 导电层表面产生二次电子发射所引起的.当有 ITO 导电层的一面为瞬时阳极时,电子轰击 ITO 导电层表面产生二次电子形成的电流与放电电流相反,即形成反电流;而当有 ITO 导电层的一面为瞬时阴极时,正离子轰击 ITO 表面产生二次电子形成的电流与电流方向相同.这样就造成了有 ITO 导电层的一面为瞬时阴极时的放电电流比其做瞬时阳极时的大,同样,也造成了光信号强度的大小交替现象.由图 6 可知,在单层玻璃 DBD 中二次电子发射现象更加剧烈,使得电流上下半周大小差别更大(上半周约为 26 mA ,下半周约为 36 mA ,差值约为 10 mA).

实验还对单面有 ITO 导电层的双玻璃 DBD 中的单放电丝进行了时空分辨.图 7 给出了单面有 ITO 导电层的双玻璃 DBD 中产生的单放电丝的时空分辨信号.图中分别给出放电通道(放电丝中心)—放电通道边缘—放电丝晕的中心—放电丝晕的边缘四个位置的信号(图(3)中 A, B, C, D 4 个位置).由图 7 可知,放电信号由中心向外光信号上下

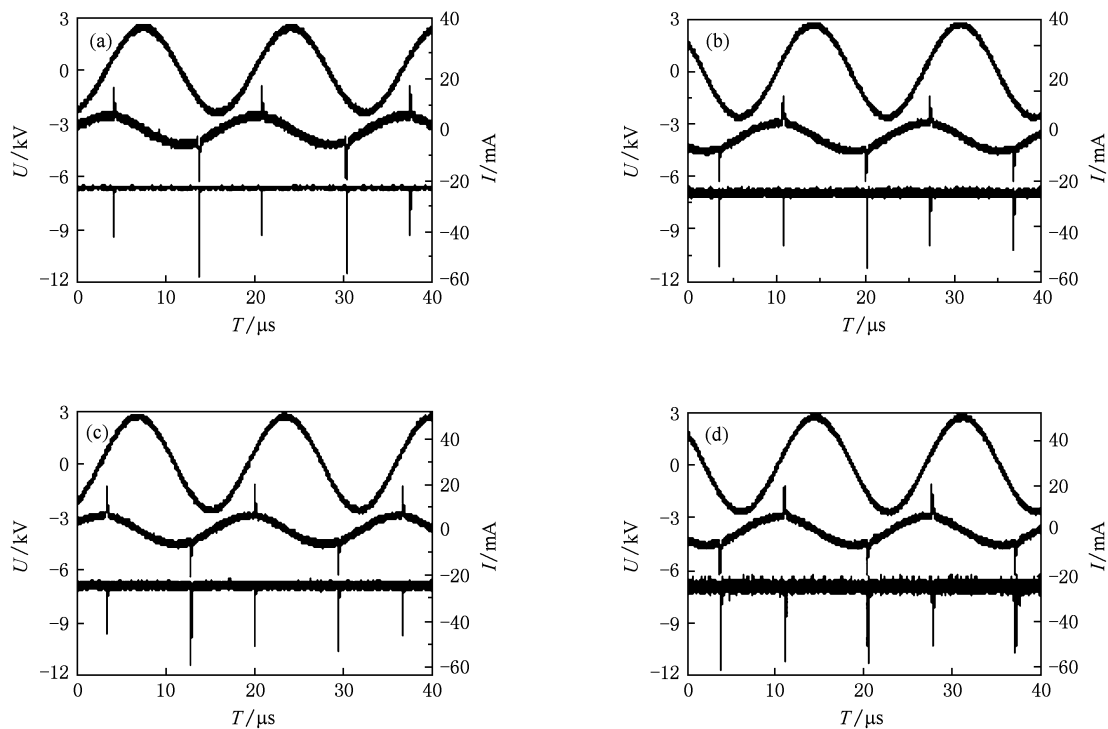


图7 图3(b)所示的有ITO导电层的DBD中单放电丝中4个位置的发光信号(底部曲线)、电压(顶部曲线)和电流(中部曲线)波形 (a) A点, (b) B点, (c) C点, (d) D点

半周期大小交替变化的现象越来越不明显:由中心处大小之比约为2:1到边缘处的1:1.这可能是由于放电通道内产生的二次电子发射现象比较明显,导致光信号强度上下半周期大小交替现象明显.

4. 结 论

设计制作了单面有ITO导电介质层的双玻璃介质层的介质阻挡放电装置,研究了其放电特性,并将其与双玻璃介质层和单玻璃介质层的介质阻挡

放电进行了比较.从电荷运输的角度分析,上述三种装置分别实现了电荷的二维、零维和三维运输.采用两种不同的双玻璃介质层装置,获得了单个稳定的放电丝.与无ITO导电层的双玻璃结构得到的单个放电丝相比,单面有导电ITO介质的双玻璃结构中单放电丝呈“T”字型,其光晕直径大小是前者光晕的2倍,其放电电流大于前者电流,其放电时间间隔长短交替现象更明显,且存在强度大小交替的现象.分析表明,壁电荷运输及二次电子发射的不同导致了不同电介质结构放电特性的不同.

- [1] Stollenwerk L 2009 *New J. Phys.* **11** 103034
- [2] Stollenwerk L, Laven J G, Purwins H -G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 255001
- [3] Reece R J, Jozef R, Dai X, Sherman D M 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 555
- [4] Kogelschatz U 2003 *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **23** 1
- [5] Duan X X, Ouyang J T, Zhao X F, He F 2009 *Phys. Rev. E* **80** 016202
- [6] Shi H, Wang Y H, Wang D Z 2008 *Phys. Plasmas* **15** 122306
- [7] Zhang H Y, Wang D Z, Wang X G 2007 *Chin. Phys.* **16** 1089
- [8] Ouyang J T, He F, Mao J S, Feng S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5969 (in Chinese) [欧阳吉庭、何 锋、缪劲松、冯 硕 2006 物理学报 **55** 5969]
- [9] Zhang Y, Gu B, Wang W C, Peng X W, Wang D Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5532 (in Chinese) [张 燕、顾 彪、王文春、彭许文、王德真 2009 物理学报 **58** 5532]
- [10] Dong L F, Yang L, Zhang Y Z, Yue H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8461 (in Chinese) [董丽芳、杨 丽、张彦召、岳 哈 2009 物理学报 **58** 8461]
- [11] Li G, Xu Y J, Mu K J, Nie C Q, Zhu J Q, Zhang Y, Li H M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6444 (in Chinese) [李 钢、徐燕

- 骥、穆克进、聂超群、朱俊强、张 翼、李汉明 2008 物理学报 **57** 6444]
- [12] Yin Z Q, Wan J Y, Huang M Q, Wang H J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7078 (in Chinese) [尹增谦、万景瑜、黄明强、王慧娟 2007 物理学报 **57** 6444]
- [13] Zhang Z T, Yang B, Xiao Y, Xu Y, Wu X D 2004 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **24** 208 (in Chinese) [张芝涛、杨波、肖 宇、许 阳、吴晓东 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 208]
- [14] Wang Y H, Wang D Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1694 (in Chinese) [王艳辉、王德真 2003 物理学报 **52** 1694]
- [15] Strümpel C, Astrov Y A, Purwins H -G 2002 *Phys. Rev. E* **65** 066210
- [16] Strümpel C, Purwins H -G 2001 *Phys. Rev. E* **63** 026409
- [17] Astrov Y A, Ammelt E, Purwins H -G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **21** 3129
- [18] Dong L F, Ran J X, Mao Z G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161501
- [19] Merbahi N, Sewraj N, Marchal F, Salameo Y, Millet P 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1664
- [20] Gurevich S V, Amiranashvili Sh, Purwins H -G 2006 *Phys. Rev. E* **74** 066201

Characteristics of dielectric barrier discharge with different dielectric layer structures *

Dong Li-Fang^{1)†} Yang Yu-Jie¹⁾ Liu Wei-Yuan¹⁾ Yue Han¹⁾ Wang Shuai¹⁾ Liu Zhong-Wei²⁾ Chen Qiang²⁾

1) (College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

2) (Laboratory of Plasma Physics and Materials, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

(Received 30 March 2010; revised manuscript received 27 April 2010)

Abstract

A dielectric barrier discharge device with two glass dielectric layers, one of which is covered with an indium tin oxide (ITO) conductive layer, was designed. Its discharge characteristics was studied and compared with that in dielectric barrier discharge devices with two glass dielectric layers and single glass layer. The charge transport in two dimensions, zero dimension, and three dimensions were realized by the above three devices respectively. Single steady filament is obtained in the two devices with two glass layers. Different from the single filament obtained in the device with two glass dielectric layers without ITO conductive layer, the single filament obtained by using the device of two glass dielectric layers with ITO conductive layer in one side was "T" shapes, its halo was twice as much as that of the former, its current was greater, and the phenomenon of discharge interval changing alternatively between long and short was more evident. Moreover, the discharge intensity also varied alternatively between strong and weak. The analysis indicated that the differences of the wall charge transport and secondary electron emission between different dielectric structures lead to different discharge characteristics.

Keywords: dielectric barrier discharge, wall charge, secondary electron emission

PACS: 52.80.Pi, 52.20.-j

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 10975043, 10775037), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. A2008000564, A2010000185), and the Open Program of Beijing Key Laboratory of Printing and Packaging Materials and Technology, Beijing Institute of Graphic Communication, China (Grant No. KF201006).

† E-mail: donglf@mail.hbu.edu.cn