

石英管对空气中锥-板结构纳秒脉冲放电的影响*

吕晓桂 任春生[†] 马腾才 朱海龙 钱沐扬 王德真

(大连理工大学物理与光电工程学院, 大连 116023)

(2010 年 2 月 2 日收到; 2010 年 6 月 25 日收到修改稿)

报道了石英管对大气压下空气中锥-板电极结构纳秒脉冲放电的影响实验研究. 实验过程中发现将石英管纵向移动位置, 放电会出现四种明显不同的形貌状态, 对其机理进行了初步的探讨. 利用发射光谱诊断了其转动和振动温度(分别为 295 和 2200 K), 表明该等离子体具有高度非平衡度. 还进一步提出大气压下空气中产生类辉光放电的有效途径.

关键词: 纳秒脉冲放电, 空气, 纵向介质, 非平衡等离子体

PACC: 5200, 5270K, 5235P

1. 引 言

近年来, 大气压辉光放电因其在杀菌^[1]、表面处理^[2]、污水处理^[3]及其它方面^[4, 5]的广泛应用引起了人们的关注. 大量的研究表明, 在 He, N₂及其它气体中^[6-10]通过介质阻挡的方式能够实现大气压辉光放电. 然而, 要在空气中实现大气压辉光放电仍然存在困难, 需要继续研究. 纳秒脉冲放电具有高非平衡度^[11], 高效率^[12]等显著优势, 被广泛用于空气放电中. 但是, 纳秒脉冲的高功率密度很容易引起热不稳定性, 使放电由电晕过渡到火花或者是丝状放电^[13].

有研究表明^[14, 15], 与放电轴向垂直的介质能使空气中纳秒脉冲放电变得均匀. 也有工作研究了平行于放电轴向的介质对正向纳秒脉冲放电的影响^[16-19]. 文献[16]研究了不同介电常数、不同厚度、不同表面状况和不同位置的介质板对纳秒脉冲放电特性(如放电电流幅值、流柱结构等)的影响. 文献[19]中研究了石英介质管对纳秒脉冲放电的影响, 实验证明, 轴向介质对放电产生较大的影响.

本文将石英管置于纳秒脉冲放电电极间, 实验发现将石英管纵向移动位置, 会出现四种明显不同的形貌状态, 我们对其机理进行了初步的探讨, 利

用发射光谱诊断了其转动振动温度, 分析结果表明该等离子体具有高度非平衡度, 并提出大气压下空气中产生类辉光放电的有效途径.

2. 实验装置与测量

实验和测量装置如图 1 所示. 电源为俄罗斯托木斯克理工大学高压所制造的三级磁脉冲压缩技术产生的高压短脉冲电源(型号: И С Т О Ч Н И К П И Т А Н И Я 500Вr, 平均功率为 500 W), 其产生的脉冲电压参数如下: 最大电压幅值 40 kV, 频率 100—1200 Hz 分段可调, 最短上升沿 20 ns, 最窄半宽 50 ns. 高压脉冲信号通过同轴电缆的内芯传输到锥状铜电极(锥度为 30°), 平板铜地电极与同轴电缆的外皮相连, 高低压电极之间纵向放置一石英管, 整个放电装置由圆柱形不锈钢腔屏蔽. 与放电通道并联一水电阻, 通过调节水电阻的大小调节放电通道间电压的大小, 该水电阻同时还起到调节外回路与负载之间的匹配, 减少反射电压波的作用. 放电电压用高压探头 Tektronix P6015A 测量, 并送入示波器 Tektronix DPO4104(带宽 1 GHz, 采样率 5 GS/s)进行读取. 放电发射光谱由光谱仪 Acton Research Spectrum-2500i 采集, 实验图片用数码相机富士 S602zoom 拍摄, 曝光时间为 0.3 s.

* 国家自然科学基金(批准号: 10775027), 辽宁省自然科学基金(批准号: 20072179)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: rchsh@dlut.edu.cn

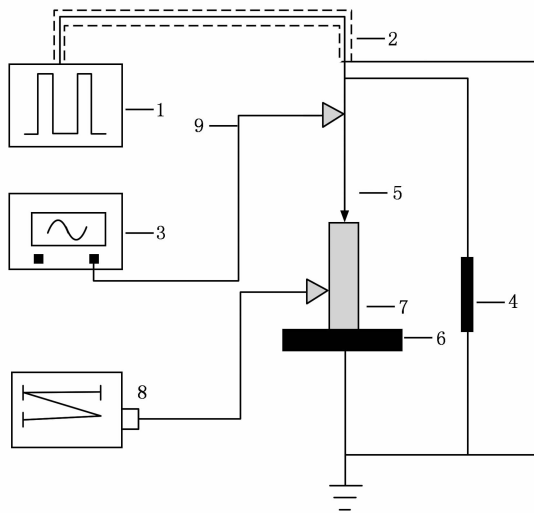


图1 实验装置图 1 电源;2 同轴电缆;3 示波器;4 水电阻;5 锥状电极;6 地电极;7 石英管;8 光谱仪;9 高压探头

3. 实验结果与分析

实验电压为 25 kV, 频率 600 Hz, 电压波形见图 2. 放电腔内示意图如图 3(a) 所示, 锥状电极的底部半径为 0.3 cm, d 是两电极之间的距离, 为 1.3 cm, h 是石英管下端口与地电极间距, 为可调节变量, 石英管内壁半径为 0.4 cm. 图 3 中的五张照片分别对应于没有放置石英管和 h 依次为 1.1, 0.9, 0.4, 0 cm 的放电状态.

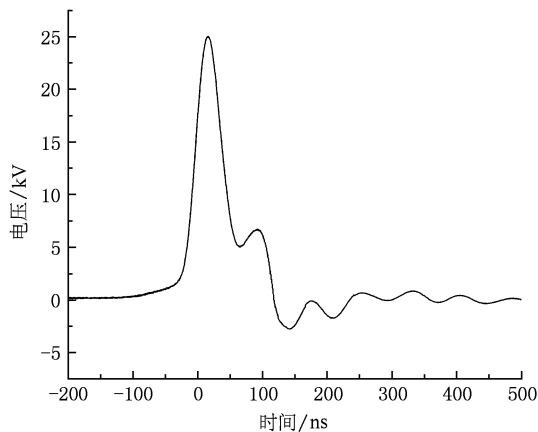


图2 电压波形图

实验过程中观察到, 当放电间隙未放置石英管时, 电场分布与电极形状有关, 放电通道向外扩散, 为类锥状, 且分布不均匀, 地电极上发亮的斑点对应于较亮的放电通道. 介入内壁半径为 0.4 cm 的石英管后, 石英管内壁积累电荷, 产生一个静电场,

(我们此处称之为叠加电场), 使电场分布发生较大的改变^[18], 对放电通道起到箍缩作用, 当 h 为 1.1 cm 时, 分散的放电通道收缩为一个主要的放电通道, 此放电通道弯曲且不稳定, 随着移动的阴极斑而移动, 我们认为阴极斑的移动可能是由以下原因导致的: 一是热气压的变化; 二是不同周期放电通道的随机选择性. 当 h 为 0.9 cm 时, 石英管内壁积累电荷增多, 叠加场增强, 对放电通道作用增强, 所以放电通道变为稳定的一个通道. 当 h 减少至 0.4 cm 时, 放电截面增大, 与石英管的截面积基本一致, 从端面看放电均匀. 我们认为这是由于叠加场的负反馈作用, 抑制了放电密度, 避免局部强烈放电, 获得了空气中大气压下类辉光放电. 当石英管置于地电极上, 即 h 为 0 cm 时, 放电明显变暗, 这是由于反向场的强烈作用导致的. 除此之外, 脉冲放电期间等离子体密度随时间变化, 石英管限制放电等离子体的扩散, 从而石英管的不同放置位置引起放电气体密度分布的不同变化, 进一步导致放电通道的变化.

对应上述五种状态分别采集了发射光谱. 光谱仪工作时主要参数设定为: 狭缝 50 μm , 积分时间 1000 ms, 光栅常数 2400 L/mm, 光纤探头置于放电中心轴线距离地电极 0.2 cm 处. 各种情况下发射光谱强度分布和谱线分布是一致的, 说明石英管的介入没有改变等离子体的粒子成份和温度等参数. 不同的地方在于, 不同的状态谱线强度不同, 图 4 给出了对应于图 3(c) 和 图 3(e) 的发射光谱.

为了得到等离子体的转动温度和振动温度, 利用氮气的第二正带系 $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ($\Delta v = -2$) 跃迁的谱带, 我们将不同振动温度和转动温度下模拟计算得到的谱带和实验得到的谱带进行点对点比较, 从而确定等离子体射流的振动温度和转动温度(如图 5 所示), 得到转动温度和振动温度分别为 295 和 2200 K. 通常说来, 在一般体系中(气压不是特别低), 转动温度可以认为与平动温度相同. 因为分子的转动能级间隙一般很小, 通常远比振动能小, 借助于一般非弹性碰撞, 可以改变转动能并达到热平衡, 所以用光谱发射法测等离子体转动温度即可得到等离子体的动力学温度. 实验得到的转动温度 295 K 与利用光纤温度传感器 FOT-L/FOT-H 测得的温度为 295.6 K 相符合, 这也说明在纳秒级脉冲电压的作用下气体分子和离子动能变化的很小, 所

以气体温度基本不变；振动温度为 2200 K 远大于转动温度 295 K，表明纳秒脉冲等离子体是处于高度

非平衡状态，放电能量基本消耗在电子的加速上，离子与分子基本不被加速。

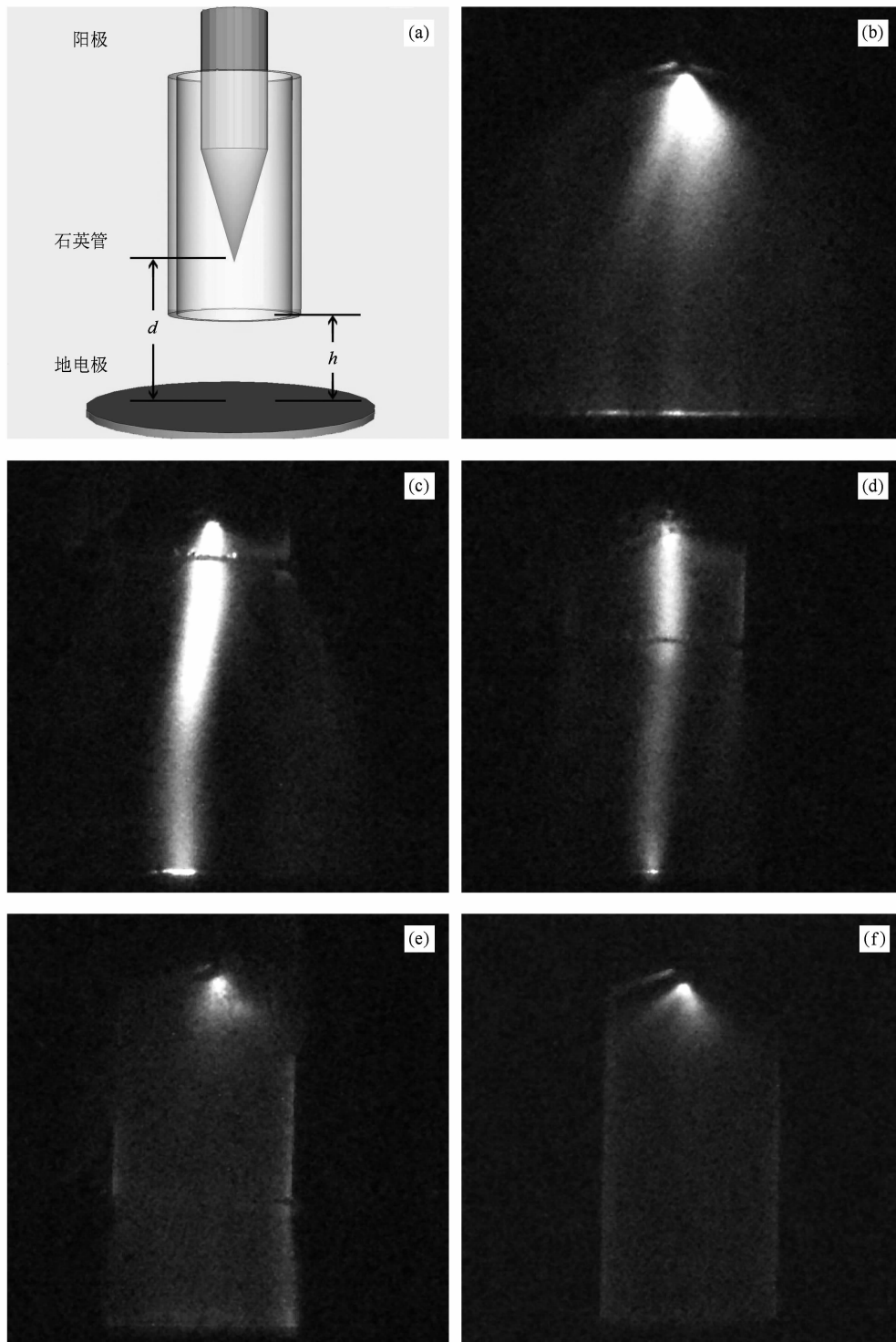


图3 放电腔结构图及放电照片 (a)放电腔细节图,放电照片;(b)没有放置石英管;(c) $h = 1.1$ cm;(d) $h = 0.9$ cm; (e) $h = 0.4$ cm;(f) $h = 0$ cm

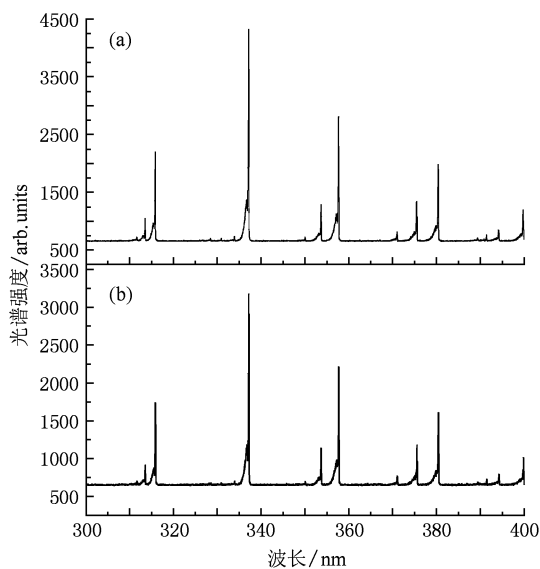


图4 与实验状态对应的发射光谱 (a) 对应于图3(c);(b) 对应于图3(e)

4. 结 论

实验通过变化纵向放置石英介质管相对接地

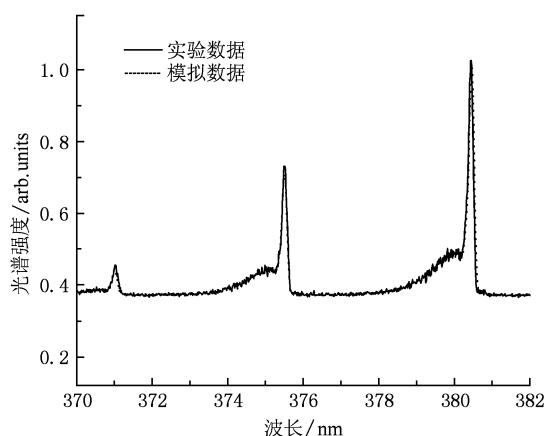


图5 发射光谱模拟数据与实验数据的对比

平板电极的距离,观察放电现象的变化,得到了四种明显不同的状态.分析其原因,主要是由于管壁积累电荷的负反馈作用导致的.我们对各种状态进行了光谱分析,发现各谱线只在强度大小存在差异.通过实验与模拟的对比,得到转动温度和振动温度分别为 295 和 2200 K,表明纳秒脉冲等离子体是处于非平衡等离子体状态.其中当 h 为 0.7 cm 时,获得了大气压下空气中类辉光放电.

- [1] Kelly-Wintenberg K, Sherman D M, Tsai P P Y, Gadri R B, Karakaya F, Zhiyu C, Roth J R, Montie T C 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 64
- [2] Massines F, Gouda G 1998 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31** 3411
- [3] Jiang C, Mohamed A A H, Stark R H, Yuan J H, Schoenbach K H 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 1416
- [4] Sawada Y, Kogoma M 1997 *Powder Technol.* **90** 245
- [5] Mori T, Tanaka K, Inomata T, Takeda A, Kogoma M 1998 *Thin Solid Films* **316** 89
- [6] 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]
- [7] Hao Y P, Yang L, Tu E L, Chen J Y, Zhu Z W, Wang X L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2610 (in Chinese) [郝艳捧、阳林、涂恩来、陈建阳、朱展文、王晓蕾 2010 物理学报 **59** 2610]
- [8] Kanazawa S, Kogoma M, Moriawaki T, Okazaki S 1988 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** 838
- [9] Gherardi N, Gouda G, Gat E, Ricard A, Massines F 2000 *Plasma Sources Sci. Technol.* **9** 340
- [10] Trunec D, Brablec A, Buchta J 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 1697
- [11] Starikovskaia S M, Anikin N B, Pancheshnyi S V, Zatssepina D V, Starikovskii A Y 2001 *Plasma Sources Sci. Technol.* **10** 344
- [12] Krasnochub A V, Vasilyak L M 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 1678
- [13] Takaki K, Hosokawa M, Sasaki T, Mukaigawa S, Fujiwara T 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 151501
- [14] Shao T, Long K H, Zhang C, Yan P, Zhang S C, Pan R Z 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 215203
- [15] Kirpichnikov A A, Starikovskii A Y 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 898
- [16] Timatkov V V, Pietsch G J, Saveliev A B, Sokolova M V, Temnikov A G 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 877
- [17] Akyuz M, Gao L, Cooray V, Gustavsson T G, Gubanski S M, Larsson A 2001 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **8** 902
- [18] Abdel-Salam M, Weiss P, Lieske B 1992 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **27** 309
- [19] Zhang Y T, 2007 *Ph. D Thesis* (Dalian University of Technology) (in Chinese) [张禹涛 2007 博士学位论文(大连理工大学)]

Influence of quartz tube on the nanosecond pulsed discharge in a cone-to-plane air gap^{*}

Lü Xiao-Gui Ren Chun-Sheng[†] Ma Teng-Cai Zhu Hai-Long Qian Mu-Yang Wang De-Zhen

(*School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

(Received 2 February 2010; revised manuscript received 25 June 2010)

Abstract

This letter reports on the experimental investigation of the influence of a quartz tube on the nanosecond pulsed discharge in a cone-to-plane air gap, with the quartz tube inserted between the electrodes in the direction parallel to the electric field. While the tube is moved along the axes of the electric field, four different phenomena appear, of which the possible mechanism is discussed. The characteristics of the discharges are diagnosed by optical methods. For five conditions, the rotational temperatures are all 295 K, and the vibration temperatures are all 2200 K, the results mentioned above demonstrate that the plasmas generated in different conditions are in a nonequilibrium state each. Furthermore, a way to produce raise to a uniform glow-like discharge mode is proposed.

Keywords: nanosecond pulsed discharge, atmospheric air, barrier in the direction parallel to the electric field and nonequilibrium plasma

PACC: 5200, 5270K, 5235P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775027), the Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (Grant No. 20072179).

[†] Corresponding author. E-mail: rchsh@dlut.edu.cn