

光谱学方法研究介质阻挡沿面放电辉光模式的电场分布

李雪辰, 贾鹏英, 刘志辉, 李立春, 董丽芳

河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

摘要 利用介质阻挡沿面放电装置, 在低气压空气中实现了辉光放电模式。利用光电倍增管对放电发光信号进行检测, 发现外加电压每半周期出现一个发光脉冲, 并且正负半周期的光脉冲是不对称的。利用 Photoshop 软件处理放电的照片, 研究发现平行于高压电极不同位置的发光强度基本相同, 然而距离高压电极越远, 发光强度减小。放电中总电场由外加电场和电介质积累的壁电荷电场共同决定, 确定该电场具有重要意义。通过分析放电的发射光谱中 $N_2^+ (B^2_u \ X^2_g)$ 谱线 391.4 nm 和 N_2 的第二正带系 ($C^3_u \ B^3_g$) 谱线 337.1 nm 的比值, 可以定性地说明电场的分布。研究发现电场在高压电极附近较大而远离高压电极处较小。这些研究结果对沿面放电的数值模拟和工业应用具有重要的价值。

关键词 介质阻挡沿面放电; 发射光谱; 低温等离子体

中图分类号: O433.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)12-2741-04

引言

介质阻挡放电是一种非平衡交流气体放电, 已经被广泛地应用于臭氧产生、表面改性、材料生长、尾气处理、等离子体显示等诸多领域^[1-3]。介质阻挡放电的特点是两个电极之一至少要有一个被绝缘电介质层覆盖, 由于电介质层的存在, 放电一般只能由交流电压驱动。目前, 介质阻挡放电已经成为产生大气压非平衡等离子体的重要技术手段。放电过程中, 带电粒子在电场中运动会积累在电介质层上, 形成壁电荷。壁电荷的存在能熄灭本半周期的放电, 但它帮助下半周期的放电, 这就是壁电荷的记忆效应^[4]。由于该效应, 介质阻挡放电一般表现为若干随机分布的微放电丝, 而这对于材料生长、表面处理等应用不利, 因为丝状的放电必然导致材料的处理也是不均匀的。如何实现介质阻挡放电的辉光模式(无微放电丝)成为研究热点^[5, 6]。

按照装置结构的不同, 介质阻挡放电一般可以分为两种, 体放电和沿面放电。体放电中等离子体产生在两个电极之间, 而沿面放电发生在一个电介质的表面^[7]。相比而言, 沿面放电是产生大面积等离子体的重要手段, 在等离子体显示、表面改性、空天飞行器的等离子体隐身等领域具有重要的应用前景。因此对沿面放电辉光模式的研究更具有重要意义。目前, 对体放电装置研究很多, 但沿面放电装置, 尤其

沿面放电的辉光模式研究很少。

本工作利用沿面放电装置, 研究低气压空气中的辉光放电模式。利用光电倍增管研究其放电发光信号, 利用光学发射光谱, 通过分析光谱线强度比(391.4 nm 比 337.1 nm)定性研究放电的电场强度。

1 实验装置和方法

实验装置如图 1 所示。其中沿面放电装置的电极均采用金属钨制成, 两者之间被电介质(92 瓷)隔开。其中高压电极宽度为 1 mm, 长度为 30 mm, 接地电极为长 25 mm 宽 9 个毫米的矩形。陶瓷片长度为 36 mm, 宽度为 16 mm。实验中用到的高压交流电源的频率范围是 40~100 kHz, 高压输出的峰值电压为 10 kV。沿面放电装置上的电压可以通过高压探头(美国泰克公司生产, Tektronix P6015A, 1000X)来测量。放电回路中的小电阻 $R(50\Omega)$ 用来测量放电电流。放电发光通过一个透镜后成像, 二维可调节光阑置于像平面上。这样通过调节光阑的形状、大小和位置就可以利用光电倍增管选择测量放电不同区域的光信号。光电倍增管(Hamamatsu H7826-01)把通过光阑的光信息转换为电信号后送入数字存储示波器(Tektronix TDS3054B, 带宽为 500 MHz, 采样频率为 1 GHz)记录。将成像后的发光信号入射光纤一端, 光纤另一端连接光谱仪(ACTON research Spectropro2785,

收稿日期: 2007-08-12, 修订日期: 2007-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(10805013, 10647123), 河北省自然科学基金项目(A2007000134), 河北省教育厅项目(2006106)和河北大学博士启动基金项目(2006061)资助

作者简介: 李雪辰, 1976 年生, 河北大学光学工程博士后 e-mail: xcli@mail.hbu.edu.cn

2400 grooves mm^{-1}) 入射狭缝，并用 CCD (1340×400 pixels) 记录。放电发光的照片利用数码相机 (Canon Powershot G1: 1024×768 像素，曝光时间是 $8 \mu\text{s}$) 获得。

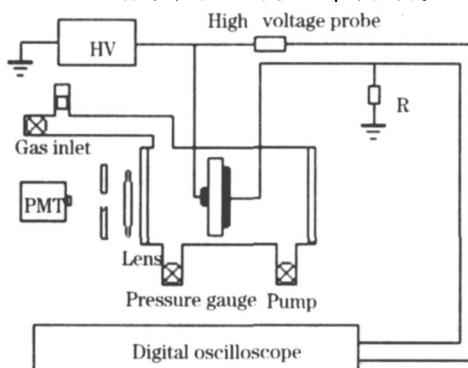


Fig 1 Experimental setup of dielectric barrier discharge

2 实验结果和讨论

当气压为 1013 Pa 时，可以实现沿面放电的辉光模式。典型的照片如图 2(a) 所示，从图可以看出放电区域不存在微放电丝，但高压电极上存在一些亮点，这些亮点可能是由于阴极溅射产生的。放电的电压和发光波形如图 2(b) 所示。显然，外加电压每半周期只有一个放电发光脉冲，这和体放电辉光模式的发光信号相似。沿面放电的光脉冲正负半周期是不对称的。从图中可以看出，正半周期的光脉冲宽度约为 $2.2 \mu\text{s}$ ，高约为 0.2 个单位，但负半周期放电光脉冲宽度约为 $0.6 \mu\text{s}$ ，高约为 0.7 个单位。放电发光信号正负半周期的这种不对称可能是由于放电电极本身不对称造成的。

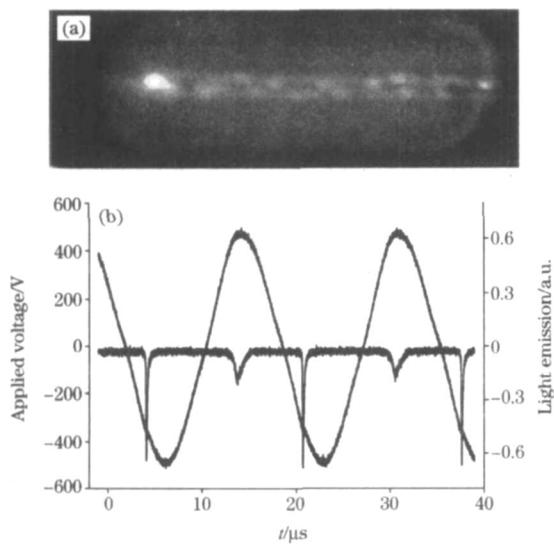


Fig 2 Typical image of glow surface discharge (a) and waveform of light signal from the discharge (b)

利用 Photoshop 软件，对图 2(a) 的照片进行分析可以获得光强的分布。图 3(a) 是平行高压电极不同位置处各色光强的分布。这个结果表明距离高压电极距离相等的各点发光强度基本相同。图 3(b) 是相对高压电极中心不同距离处光强的

分布，可见随距离增大，发光强度减小。这些结果说明沿面放电虽然没有微放电丝，但放电的强度也不完全相同。

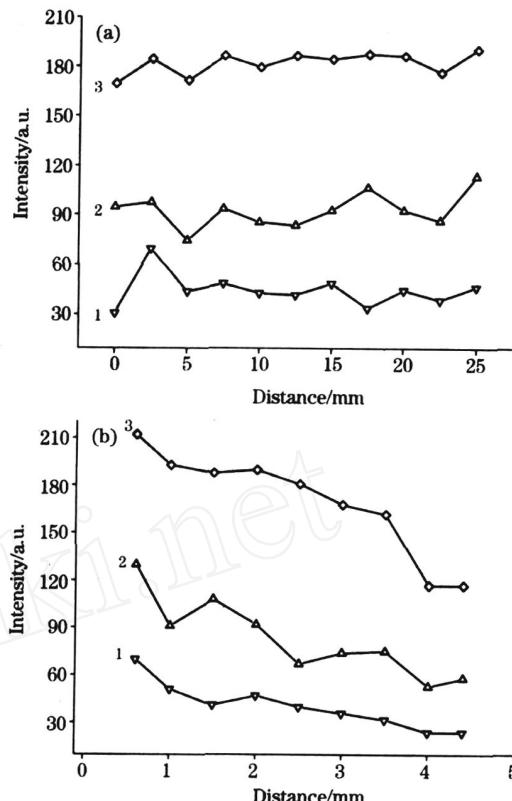


Fig 3 Emission intensity as a function of distances along the powered electrode (a) and the emission intensity as a function of distances perpendicular to the powered electrode (b)

1: Red; 2: Green; 3: Blue

图 4 是该辉光放电的一个典型发射光谱。从图中可以看出，光谱主要为氮的光谱带系，其中包括氮分子第二正带系 (337.1 nm 谱线) 和氮分子离子第一负带系 (391.4 nm 谱线)。氮分子主要通过与能量大于 11 eV 的电子碰撞而由基态跃迁到第二正带系的激发态。氮分子通过与能量大于 18.7 eV 的电子碰撞电离而跃迁到氮分子离子第一负带系激发态。

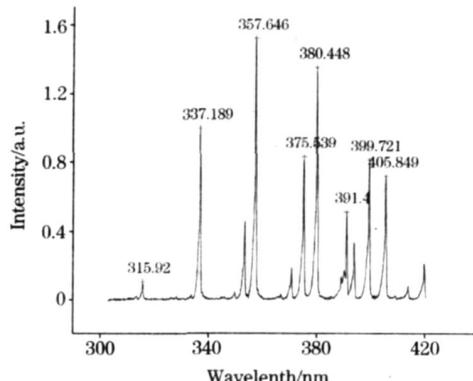


Fig 4 Emission spectra between 300 nm and 420 nm from the surface glow discharge

从以上分析看出，光谱线强度比(391.4 nm 比 337.1 nm)反映了放电等离子体中高能电子的比例，谱线强度比越大则电子温度越高。在气体放电中，电子温度由不同位置的电场决定，电场越大则电子温度越高，所以通过比较不同位置的谱

线强度比则可以定性说明电场强度的大小。

图 5 给出了不同位置处谱线 391.4 nm 的强度(其中 337.1 nm 谱线已经实现了归一化)。在图 5 中，391.4 nm 谱线强度越大则说明该位置的电场越强，所以图 5 表明沿面放电辉光模式中靠近高压电极处的电场比边缘电场要大。

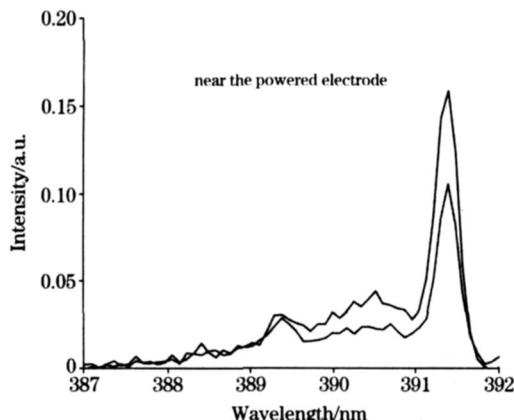


Fig. 5 Relative intensities of 391.4 nm spectral line from the discharge near the powered electrode and the discharge edge

3 结 论

利用介质阻挡沿面放电装置，在1013 Pa 空气中实现了一种辉光放电模式，发现外加电压每半周期出现一个发光脉冲，并且正负半周期的光脉冲是不对称的。利用 Photoshop 软件处理放电的照片，研究发现平行于高压电极不同位置的发光强度基本相同，然而距离高压电极越远，发光强度减小。通过分析放电的发射光谱中 $N_2^+ (B^2_u \ X^2_g)$ 谱线 391.4 nm 和 N_2 的第二正带系 ($C^3_u \ B^3_g$) 谱线 337.1 nm 的比值，定性地说明电场在高压电极附近较大而远离高压电极处较小。在沿面放电中电场由外加电场和电介质积累的壁电荷电场共同决定，确定该电场对沿面放电的数值模拟和工业应用具有重要的价值。

参 考 文 献

- [1] DONG Li-fang , MAO Zhi-guo , YIN Zeng-qian , et al. Appl. Phys. Lett. , 2004 , 84(25) : 5142.
- [2] LI Xue-chen , WANG Long. Chin. Phys. Lett. , 2005 , 22: 416.
- [3] DONG Li-fang , RAN Jun-xia , YIN Zeng-qian , et al(董丽芳,冉俊霞,尹增谦,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析) , 2005 , 25(8) : 1184.
- [4] SHI Jir-chao , CHEN Jin-zhong , WEI Yan-hong , et al(史金超,陈金忠,魏艳红,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析) , 2006 , 26(5) : 798.
- [5] Kunhardt E E. IEEE Trans. Plasma Sci. , 2000 , 28(1) : 189.
- [6] YIN Zeng-qian , DONG Li-fang , LI Xue-chen , et al(尹增谦,董丽芳,李雪辰,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析) , 2003 , 23(3) : 607.
- [7] DONG Li-fang , LIU Feng , LI Shufeng , et al(董丽芳,刘峰,李树锋,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析) , 2006 , 26(5) : 802.

Determination of Electric Field Distribution in Dielectric Barrier Surface Glow Discharge by Spectroscopic Method

LI Xue-chen , JIA Peng-ying , LIU Zhi-hui , LI Li-chun , DONG Li-fang

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

Abstract In the present paper , stable glow discharges were obtained in air at low pressure with a dielectric barrier surface discharge device. Light emission from the discharge was detected by photomultiplier tubes and the research results show that the light signal exhibited one discharge pulse per half cycle of the applied voltage. The light pulses were asymmetric between the positive half cycle and the negative one of the applied voltage. The images of the glow surface discharge were processed by Photoshop software and the results indicate that the emission intensity remained almost constant for different places with the same distance from the powered electrode , while the emission intensity decreased with the distance from the powered electrode increasing. In dielectric barrier discharge , net electric field is determined by the applied voltage and the wall charges accumulated on the dielectric layer during the discharge , and consequently , it is important to obtain information about the net electric field distribution. For this purpose , optical emission spectroscopy method was used. The distribution of the net electric field can be deduced

from the intensity ratio of spectral line 391.4 nm emitted from the first negative system of N_2^+ ($B\ ^2\ _u^+\ X\ ^2\ _g^+$) to 337.1 nm emitted from the second positive system of N_2 ($C\ ^3\ _u^- B\ ^3\ _g^-$). The research results show that the electric field near the powered electric field is higher than at the edge of the discharge. These experimental results are very important for numerical study and industrial application of the surface discharge.

Keywords Dielectric barrier surface discharge; Emission spectrum; Low temperature plasma

(Received Aug. 12, 2007; accepted Nov. 16, 2007)

第二届全国表面增强光谱专题研讨会在苏州大学召开

10月29日~11月1日，第二届全国表面增强光谱专题研讨会在苏州大学召开。全国表面增强光谱界专家学者齐聚古城苏州，畅谈表面增强光谱的现状及发展前景。此次会议受中国光散射专业委员会委托，由苏州大学和厦门大学承办，并由苏州大学顾仁敖教授和厦门大学田中群教授任会议主席，苏州大学姚建林教授和厦门大学任斌教授任会议秘书长。苏州大学顾仁敖教授主持了开幕式并致欢迎辞。苏州大学副校长路建美教授、厦门大学田中群院士、中国光散射专业委员会秘书长刘玉龙教授、苏州大学化学化工学院执行主任郎建平教授在会上分别讲话，并预祝大会取得圆满成功。

早在1988年10月，受中国光散射专业委员会委托，由苏州大学凌德洪教授和顾仁敖教授承办了首届表面增强拉曼光谱(SERS)专题研讨会，国内表面增强拉曼光谱的研究学者交流和研讨了该领域的发展，这次会议奠定了我国表面增强拉曼光谱研究和发展的基础。现在距离1988年第一届专题研讨会已经二十年，这二十年中，表面增强拉曼光谱在中国得到了快速发展，期间表面增强红外效应的发现进一步拓展了表面增强光谱的研究和应用。随着表面增强光谱研究队伍的不断壮大，研究水平的不断提升，我国在国际表面增强光谱学界已占有一定地位。

二十年过去了，当年开展SERS研究的先行者已经或即将退休，而年青学者在此领域中也已开始独挡一面，为了聚集表面增强光谱的老、中、青研究者共话表面增强光谱的发展前景，交流和展示我国在表面增强光谱及相关领域所取得的最新研究进展及成果，增进广大表面增强光谱科学工作者和支持者的交流与合作，以求得互相促进，共同发展，中国光散射专业委员会决定由苏州大学和厦门大学承办，在苏州大学召开第二届全国表面增强光谱专题研讨会。

本届研讨会共遴选论文55篇，参加会议的单位40多个，参加会议的代表100余人。会议论文包括表面增强拉曼、表面增强红外、荧光增强，表面等离子体等光谱技术在化学、物理、材料、生物、医药、环境等方面最新的研究成果。会议邀请国际著名SERS研究专家美国Emory大学聂书明教授等4个大会特邀报告，来自国内表面增强光谱主要研究小组的20个分会邀请报告，同时会议采用圆桌讨论及墙报展形式进行了充分的讨论和交流。此外，有7家主要的国内外光谱仪器厂商到会展示或报告光谱仪器等方面的最新进展。

此次研讨会的首个特邀报告由聂书明教授介绍单分子和单纳米粒子的SERS，及其从物理学基础到癌症检测方面的进展，聂教授还以个人的亲生经历勉励年轻学者踏实从事科学研究，随后的特邀报告和邀请报告均来自国内表面增强光谱研究主要课题组，他们介绍了课题组的最新研究成果，报告后的讨论十分热烈，学术气氛浓厚。会议期间展出的墙报同样体现了该领域最新的研究成果，学者们的交流异常活跃，最终经专家认真评审后颁发了八名优秀墙报奖。在最后一天的圆桌讨论会上，与会代表畅谈了表面增强光谱的发展前景，不仅为表面增强光谱的发展指明了道路，同时也殷切期盼年轻一代能继承和发扬前辈们刻苦钻研的精神，大胆探索，勇于创新，敢于把理论知识实践化。在闭幕式上，厦门大学田中群院士为表面增强光谱规划了蓝图，他的报告不仅再一次为年轻学者夯实了基础，同时也指出了学者们研究表面增强光谱所存在的问题。与会代表盛赞这次会议学术氛围好，受益匪浅。

会议期间，苏州大学校长朱秀林教授会见了部分专家，感谢他们长期以来与苏大的真诚合作和支持。