

一种准光反射聚焦微波放电大气等离子体装置^{*}

杨 浩, 闫二艳, 郑强林, 刘 忠, 胡海鹰

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 设计了一种准光反射聚焦方式的微波放电大气等离子体实验装置, 装置包括大气环境模拟室和微波辐射聚焦系统。辐射微波在腔室中心形成 kV/cm 量级的非均匀强场, 击穿大气产生等离子体。通过仿真计算了腔室内的空间辐射场分布, 并利用小信号传递的方式进行测量, 测量结果与仿真相符, 形成的等离子体形态与辐射场分布强弱一致。电磁场在聚焦区域形成驻波, 等离子体出现明显分层现象。实验通过拍照记录了不同参数条件下的等离子体图样, 等离子体形态随气压升高而收缩, 放电区域受场强和气压共同影响。对实验结果进行分析, 验证了该装置的能力。

关键词: 微波放电; 等离子体; 反射聚焦; 电场测量; 击穿阈值

中图分类号: O531 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.180350

A microwave plasma system with quasi optical focusing reflector

Yang Hao, Yan Eryan, Zheng Qianglin, Liu Zhong, Hu Haiying

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, CAEP P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: Microwave discharge is a kind of non-polar mode, which may form plasma that has the characteristics of transient, low temperature, non-equilibrium and so on at atmospheric pressure. A microwave plasma experimental facility with quasi optical focusing reflector is introduced, including the atmospheric environment simulation chamber and microwave transmission focusing system. A non-uniform strong electric field of kV/cm magnitude formed by focusing microwave power in the chamber, with plasma motivated in the central region. The distribution of the electric field in the chamber is calculated and measured. The results are in good agreement. And the shape of the plasma is also consistent with the intensity of the electric field. The plasma images under different parameters were observed by the camera through the device. The capability of the device was verified, which laid a foundation for further study of microwave atmospheric breakdown.

Key words: microwave discharge; plasma; focusing reflector; electric field measurement; breakdown threshold

PACS: 41.20.Jb; 52.50.Sw; 52.70.GW

随着高功率微波技术的发展, 微波源辐射功率的提升使得微波击穿大气产生空间孤立等离子体成为可能。这种等离子体具有瞬变、低温、非平衡等特点, 既无电极污染也无器壁污染, 其所具有的诸多特殊物理性质使之具有广泛的经济应用潜力, 如电磁黑幕、人造臭氧层、微波等离子体推进、材料处理等^[1-3]。目前, 实验采用大功率微波源功率水平尚不足以直接在辐射空间内击穿大气形成等离子体, 微波等离子体相关研究多采用波导内激发模式, 其所需微波功率大幅降低, 但同时等离子体面积较小。例如用于等离子体天线研究的常压微波等离子体炬, 基于微波谐振腔模式的化学气相沉积薄膜装置, 通过环形波导狭缝激发表面波的等离子体源^[4-6]。为研究微波大气传输及微波等离子体相关应用, 项目组设计并建造了一套基于准光反射聚焦模式的微波放电大气等离子体实验装置, 可以在 kPa 量级气压下激发出大面积空间孤立等离子体。该装置在国内尚属首套, 国际上美俄等已在高功率微波大气等离子体方面开展多年研究, 处于行业领先地位^[7-8]。

* 收稿日期: 2018-12-04; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 高功率微波技术重点实验室项目

作者简介: 杨 浩(1992—), 男, 本科, 从事高功率微波等离子体研究; mushui9@qq.com。

通信作者: 闫二艳(1978—), 女, 博士, 从事高功率微波等离子体研究; yaneryan_2002@163.com。

本文首先对微波放电大气等离子体实验装置整体情况及各分系统进行了介绍;其次对该装置的关键参数空间辐射电场分布进行了详细探讨,通过仿真和测量获取了空间电场分布,并与实际拍摄的等离子体图样进行对比;最后通过几组实验对该装置的能力进行说明。

1 准光反射聚焦系统

微波放电大气等离子体实验装置可以模拟不同高度的大气环境条件,通过馈入强微波脉冲辐射场,在一定区域内聚焦产生等离子体。装置主要由微波源及辐射系统、金属反射罩、大气环境模拟室、控制及诊断系统组成。图1为实验装置整体示意图,微波源、辐射天线及反射罩共同构成微波准光反射聚焦系统,大气环境模拟室提供等离子体反应环境,腔室上布置有观察窗口及电光接口以与诊断测试系统相连,屏蔽室内形成集成化软件控制系统。

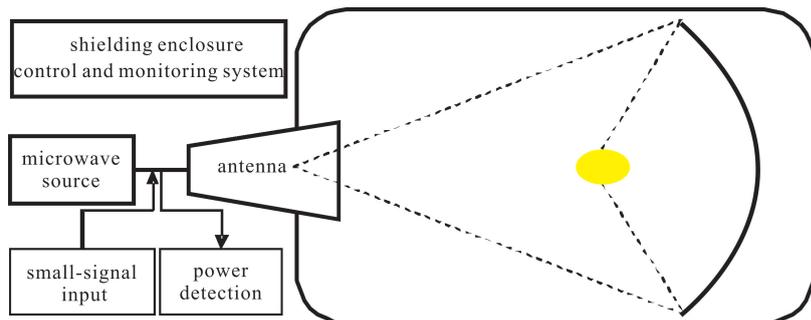


Fig. 1 Sketch map of experimental device

图1 装置示意图

装置主体为大气环境模拟室,外观是尺寸 $\phi 1800 \text{ mm} \times L2700 \text{ mm}$ 的柱形腔体,可提供气压 $10^{-3} \sim 10^5 \text{ Pa}$ 可调、热沉温度 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 可调、湿度可控、有效体积不小于 4 m^3 的大气环境,并可根据需要充入不同气体,腔体内壁覆盖有橡胶吸波材料以减少微波反射。

微波源采用固态放大器推动速调管放大器的两级放大链方案,使用微波信号发生器作为激励源,经放大后可输出 MW 峰值功率的可调脉冲微波,最终经波导、环形器和喇叭天线进行辐射,在环形器后通过定向耦合器引出小信号用于监测输出功率。微波源频率 2.92 GHz 、输出功率可调、重频 $1 \sim 1000 \text{ Hz}$ 可调、脉宽 $10 \text{ ns} \sim 20 \mu\text{s}$ 可调。

辐射天线采用多模圆口径喇叭,其波束对称性良好,易于形成圆周对称的聚焦场区,主波束具有很好的旋转对称性,绝大部分的辐射功率集中于主波束内。聚焦反射面设计为椭球面形式,口径 1400 mm ,半焦距 1100 mm 。根据几何光学原理,椭球中从一个焦点发出的光线经椭球面反射后将在另一个焦点聚焦,将辐射喇叭相位中心放置于距离反射面较远的焦点处,且轴线重合,天线辐射的电磁波经反射后将在距离较近的焦点处汇聚,在焦点区域产生很强的电场强度,用于产生并维持等离子体。

2 空间辐射场分布

真空腔室内的辐射场分布决定了等离子体的形态分布,实验要求在大气环境模拟室内形成的辐射场局域电场强度超过大气击穿阈值,同时避免微波与器壁相互作用出现面击穿现象,仅在焦点区域产生等离子体^[9-11]。项目组对准光反射聚焦系统进行了全波仿真分析,以微波频率 2.92 GHz 为例,馈入功率为 1 W 时,焦点处的场强值为 300 V/m ,腔内的仿真电场分布如图2所示,通过天线辐射的波束经椭球面反射后较好地聚焦在焦点处。

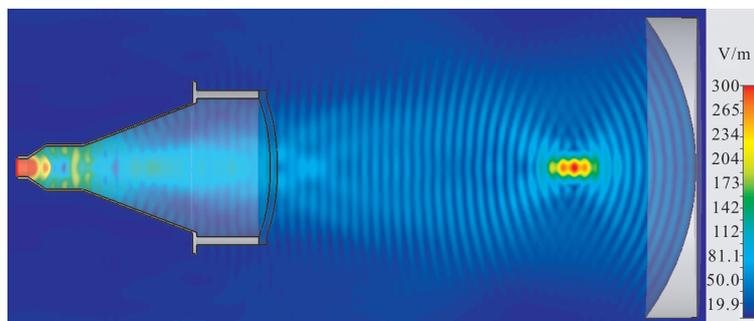


Fig. 2 Simulation of electric field distribution

图2 腔体电场分布仿真结果

仿真结果表明,理想情况下馈入功率 1 MW ,峰值场强可达 3.0 kV/cm 。针对此类封闭有限空间内的强辐射场测试存在较大困难,项目组采用小信号传递的方法对空间电场进行了测量评估。将定向耦合器更换为波同转换器并输入一定功率的小信号微波(图1中的小信号输入),在腔室内使用非金属自动传动系统携带各向

同性电场探头进行接收,先用小信号微波标定出大气环境模拟室中的空间辐射场,再利用微波传输特性,实时在线监测微波源输出功率,通过量传推算出实际空间辐射场的电场强度分布。

空间辐射场场强的具体计算方法为

$$E = \sqrt{\frac{P_{\text{large}}}{P_{\text{small}}}} E_{\text{small}} \quad (1)$$

式中: E 为空间辐射场电场强度; P_{large} 为监测到的微波源功率输出值; P_{small} 为小信号功率输出值; E_{small} 为测量的小信号在辐射场中的场强。

当小信号功率 0.25 W 时,测量得到焦点处的电场强度为 112 V/m,以此计算,当微波源输出功率为 1 MW 时,中心区域峰值场强为 2.24 kV/cm,考虑到微波空间传输中的损耗,其与仿真结果的差异在可接受范围内。将水平轴线和中心垂直轴线电场强度变化曲线归一化后与仿真结果对比,如图 3 所示,测量与仿真在水平轴线上变化趋势相符,波峰位置一致,垂直轴线上中心强场区域完全重合。

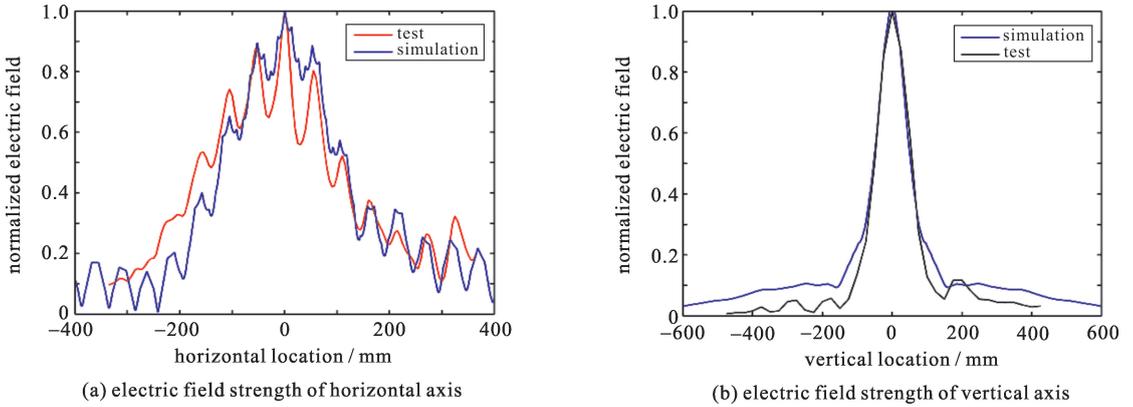


Fig. 3 Comparison of measured and simulated electric field distribution

图 3 测量与仿真电场分布对比

对中心区域垂直截面上 500 mm×500 mm 区域的电场分布进行测量,每 10 mm 一个点,归一化后结果如图 4(a)所示,两个波峰之间的距离为半波长,符合驻波理论。该装置在大气环境模拟室中心区域形成相较于边缘区域明显的强场环境,实验中产生的等离子体区域和形态与实测电场分布一致。图 4(b)为处理后的实验拍摄等离子体图像(中心竖条为皮尺,用于标定等离子体位置和区域大小),其强弱反映了等离子体光强分布,在实测电场轴线上的九个波峰位置均产生了等离子体,光强最强处出现在电场最强处偏右位置,这是因为等离子体形成后对电场产生了影响,最终呈现的是一个动态平衡的结果。

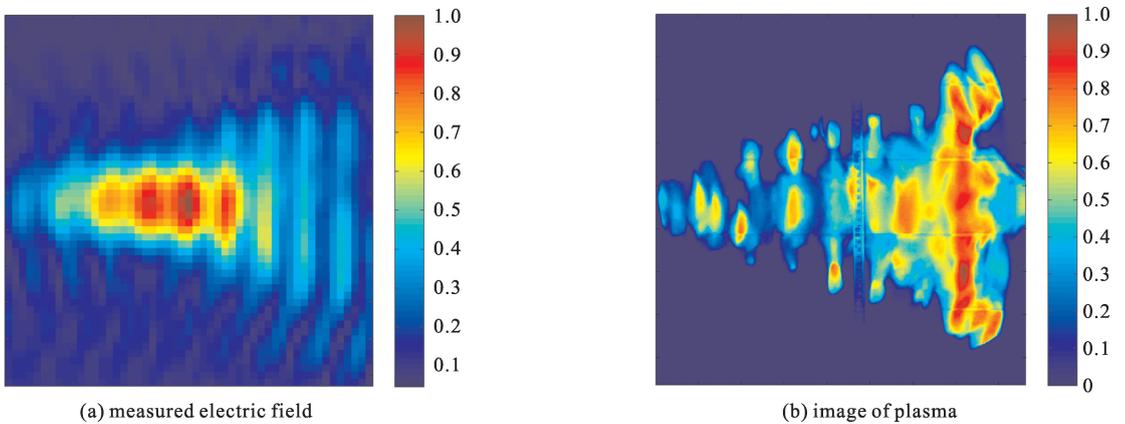


Fig. 4 Comparison of electric field and plasma

图 4 测量电场与等离子体光强对比

3 等离子体图样

利用该装置研究小组开展了初步的微波放电大气等离子体实验,主要针对不同电场强度及工作气压对等离子体放电形态的影响进行了研究,通过几组参数对放电图样作简要介绍,分析电场强度分布的影响,以检验

该装置的实验能力^[12-13]。

图 5 为工作气压 300 Pa 条件下,微波源脉宽 $2 \mu\text{s}$ 、重频 100 Hz 固定,改变场强时的等离子体放电形态和区域变化情况。放电区域随着场强的增大而扩张,但在 0.93 kV/cm 后变化不明显。根据图 3(a)垂直轴线电场分布可知,电场强度在偏离中心区域后下降很快,因此在场强增长前期等离子体区域增长明显,在后期进一步提高中心场强后,边缘区域的场强也达不到击穿阈值,故区域不再增大。

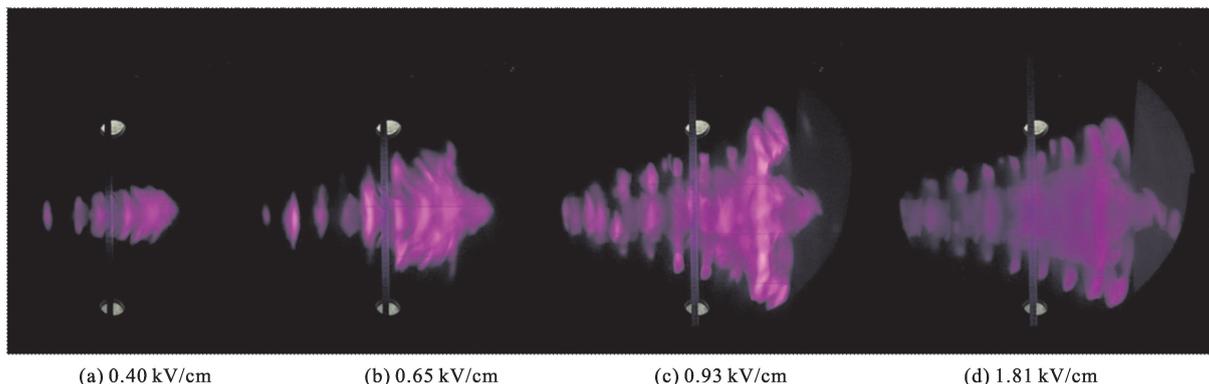


Fig. 5 Plasma images under different electric field

图 5 不同场强下的等离子体图样

图 6 为微波源脉宽 $20 \mu\text{s}$ 、重频 500 Hz、输出功率固定条件下,改变工作气压时的等离子体放电形态和区域变化情况。在低气压下,由于扩散效应,等离子体弥散到整个空间,随着气压升高,等离子体大小明显收缩,约束于强场分布区域内。

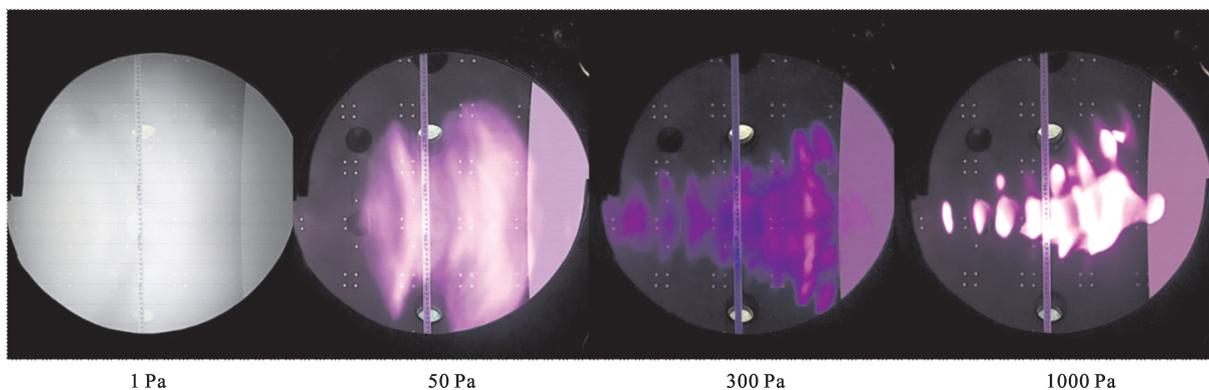


Fig. 6 Plasma images under different atmosphere pressure

图 6 不同气压下的等离子体图样

4 结 论

本文介绍了一种准光反射聚焦微波放大气体等离子体装置,可在真空腔室内产生并维持空间孤立等离子体。通过模型仿真并用小信号传递的方法测量了真空腔室内的电场分布,实测结果与仿真基本相符,峰值场强超过 2 kV/cm ,说明准光反射聚焦模式可高效利用微波辐射能量,形成体击穿。利用该装置获得了几组微波放电等离子体图样,并对其形态与区域大小进行了分析,结果与不同气压下的电场击穿阈值相关,和直流放电击穿具有相似性。目前仅对等离子体图样进行了研究,后续将依托该装置开展进一步的微波大气传输及微波等离子体研究。

参考文献:

- [1] Robert J B, Edi S. 高功率微波源与技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. (Robert J B, Edi S. High-power microwave sources and technology. Beijing: Tsinghua University Press, 2005)
- [2] Andrei V G, Victor L G. Application of high-power microwaves[M]. Artech House, 1994.
- [3] Yan Eryan, Qiu Feng, Yang Hao, et al. Research of HPM plasma breakdown characteristics[C]//APCPST2016. 2016.
- [4] 刘繁,汪建华,王秋良,等. 常压微波等离子体炬装置的模拟与设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6):1504-1508. (Liu Fan, Wang Jianhua,

- Wang Qiuliang, et al. Numerical modeling and design of atmospheric pressure microwave plasma jet. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6):1504-1508)
- [5] 刘亮,张贵新,朱志杰,等.一种大气微波环形波导等离子体设备[J].*强激光与粒子束*, 2007, 19(7):1501-1506. (Liu Liang, Zhang Guixin, Zhu Zhijie, et al. Atmospheric pressure microwave plasma system with ring waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(7):1501-1506)
- [6] 周传明,刘国治,刘永贵,等.高功率微波源[M].北京:原子能出版社, 2007. (Zhou Chuanming, Liu Guozhi, Liu Yonggui, et al. High-power microwave sources. Beijing: Atomic Energy Press, 2007)
- [7] Woo W, DeGroot J S. Microwave absorption and plasma heating due to microwave breakdown in the atmosphere[J]. *Phys Fluids*, 1984, 27(2):475-487.
- [8] Vidmar R J. On the use of atmospheric pressure plasmas as electromagnetic reflectors and absorbers[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1990, 18(4):733-741.
- [9] 邱风,闫二艳,孟凡宝,等.开放空间等离子体对微波传输影响的模拟研究[J].*强激光与粒子束*, 2015, 27:103234. (Qiu Feng, Yan Eryan, Meng Fanbao, et al. Simulation research on transmission of microwave by plasmas at open space. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27:103234)
- [10] Zhou Qianhong, Dong Zhiwei. Theoretical study on the energy loss induced by electron collisions in weakly ionized air plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62:205201.
- [11] Liao B, Zhang S J, Na Z, et al. Study on low-power microwave plasma source based on microstrip split-ring resonator[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(3):372-376.
- [12] Qiu F, Yan E, Meng F, et al. Analysis based on global model of nitrogen plasma produced by pulsed microwave at low pressure[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22:073506.
- [13] Yang W, Zhou Q, Dong Z. Simulation study on nitrogen vibrational and translational temperature in air breakdown plasma generated by 110 GHz focused microwave pulse[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24:013111.