

双层等离子体对 6 GHz 高功率微波防护实验

刘洋, 时家明, 程立, 李志刚, 张继魁, 曾杰

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽合肥 230037)

摘要: 针对高功率微波对电子设备的安全威胁, 设计了一种双层柱状等离子体阵列对高功率微波进行防护。其中单根等离子体柱的直径为 25.4 mm, 长度为 600 mm, 等离子体频率与碰撞频率可进行控制。利用搭建的实验测量系统, 研究了微波极化方向、等离子体电子密度、放电单元层数等因素对高功率微波透射衰减的影响。实验结果表明: 当高功率微波未激发等离子体产生非线性效应时, TM 极化时的防护效果优于 TE 极化时的防护效果, 且能量衰减分别可达 20.9 dB 和 14.7 dB; 随等离子体电子密度增大, 微波透射功率减小, 防护效果增强; 由于层间反射作用, 双层等离子体对高功率微波的透射衰减远大于单层等离子体衰减值的两倍。

关键词: 等离子体阵列; 高功率微波; 防护; 极化; 电子密度

中图分类号: O539 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0917008

Experiment on protection performance of two-layer plasma to 6 GHz high-power microwave

Liu Yang, Shi Jiaming, Cheng Li, Li Zhigang, Zhang Jikui, Zeng Jie

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: For the safety of electronic equipment, a two-layer barrier of cylindrical plasma array was designed to block high-power microwave (HPM). The reasonable parameters of plasma column in this experiment was designed and prepared, the diameter of single column were 25.4 mm, the length of it was 600 mm, and the plasma frequency and collision frequency were tunable according to the experiment's need. The influence of microwave polarization, the plasma electron density, and number of the discharge unit on the performance of protection to HPM were analyzed and tested. The results indicate that the protection effect of plasma array with TM polarization is better than it with TE polarization when there is no nonlinear effect. The energy attenuation value can reach 20.9 dB and 14.7 dB respectively. The microwave transmission power decreased with the increasing of electron density to improve the protection effect. The results also show that transmission attenuation of HPM in two-layer structure is two times greater than it in one-layer structure because of the interlayer reflection.

Key word: plasma array; HPM; protection; polarization; electron density

收稿日期: 2017-01-07; 修订日期: 2017-02-05

基金项目: 国防预研基金

作者简介: 刘洋(1991-), 男, 硕士生, 主要从事等离子体强电磁脉冲防护技术方面的研究。Email: Liuyang_eei@163.com

导师简介: 时家明(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事等离子体隐身与防护方面的研究。Email: shijiaming66@126.com

0 引言

作为专门研究高功率瞬态现象的机构, 国际电工委员会(IEC)定义入射电场强度超过 100 V/m 的电磁环境为高功率电磁环境^[1]。近年来, 随着高功率脉冲技术的发展^[2-3], 高功率脉冲武器应运而生, 导致战场空间的电磁环境日趋恶劣, 使电子设备面临着巨大的电磁威胁。针对这一问题, 国内外学者对高功率微波与等离子体的相互作用进行了大量的理论与实验研究^[4-10]。Bonaventura 等对于高功率微波脉冲导致的 N₂ 等离子体参数进行了系统研究, 得到了等离子体电子密度与入射场强的关系, 并分析了由此导致的微波脉冲传输特性的变化^[4]。W. W. Destler 等人实验研究了覆盖等离子体的平板对高功率微波的反射、传输和吸收, 最佳条件下后向散射衰减达 30 dB^[5]。Boeuf 等将电子扩散系数引入电子流体模型, 仿真得到等离子体动力学特性与实验结果相符^[6]。西安电子科技大学赵朋程等理论研究了 110 GHz 高功率微波在大气击穿中的传输、反射和吸收, 结果表明, 随着时间的推移, 等离子体吸收功率达到稳定饱和状态, 且远大于对微波的反射功率^[7]。国防科技大学杨耿等人实验研究了等离子体厚度和层数对 8.6~9.6 GHz 微波衰减的影响, 结果表明增加等离子体层数的衰减效果明显优于增加等离子体厚度^[8]。

我国在高功率微波防护的研究方面仍与国外存在较大差距, 相关先进技术的研究还处于起步阶段, 距实际应用尚有一定距离, 这些都严重限制了高功率电磁脉冲防护问题的深入研究。文中首先通过实验计算和分析了高功率微波对电子元件的干扰及损伤阈值, 然后以实际应用为目的, 设计了一种双层柱状等离子体阵列结构, 从时域和频域角度, 实验研究等离子体启动前后微波极化方向、等离子体电子密度、放电单元层数等因素对微波透射衰减的影响。

1 放电单元特征和高功率微波对电子元件的干扰及损伤阈值分析

文中采用圆柱形放电腔通过高频放电产生柱状等离子体, 放电腔之间紧密排列形成双层等离子体阵列。为了保证测量得到稳定的微波透射衰减曲线, 放电单元产生的等离子体要具有良好的稳定性。通过

实验分析, 单根放电管直径在 $d=2.5\text{ cm}$, 长度 $l=60\text{ cm}$, 填充某混合气体且气压在 $p=3\text{ Torr}$ ($1\text{ Torr}=133.32\text{ Pa}$), 加在放电管两端的放电频率为 85 kHz 时, 管内产生的等离子体具有较好的稳定性。等离子体单元放电电压在 120~240 V 可调, 通过改变电压调节等离子体电子密度。

高功率微波利用强电磁场使精密设备内的电子元器件, 比如晶体二极管、晶体管、集成电路、电阻及电容、滤波器、继电器和示波器等产生感应电流, 进而烧毁元器件^[11]。文中采用的高功率微波源产生的信号中心频率在 6 GHz, 频宽在 100 MHz, 调制方波脉宽在 300 ns 左右, 重频为 100 Hz, 单个脉冲峰值场强在 10 kV/m 左右。为了验证其对电子系统的损伤能力, 以 MF-51-1 型单片机为例, 实验研究了在高功率微波照射下单片机的干扰和损坏效应, 理论计算了高功率微波对单片机的干扰和损伤阈值。

图 1(a)为 MF-51-1 型单片机正常工作时, 显示屏可正常显示日期和时间等信息。图 1(b)为单片机受到一定功率高功率微波照射, 显示屏字符混乱, 日期和时间数字不断跳变。经理论计算, 此时脉冲峰值场强 E_{max} 为 2.5 kV/m, 因此该单片机干扰阈值在 2.5 kV/m 左右, 在下面的分析中, 认为 2.5 kV/m 为电子设备的干扰阈值。图 1(c)为增大照射功率, 直至单片机停止工作的情形, 此时脉冲进入内部电路, 产生感应电压, 出现功能紊乱, 误码及逻辑混乱, 此时单片机已经被损伤。经计算可得损伤阈值在 4.5 kV/m, 此时认为电子设备已失效。综上, 为了使电子设备正常工作、达到防护目的, 要使透过等离子体的脉冲峰值场强在 2.5 kV/m 以下。

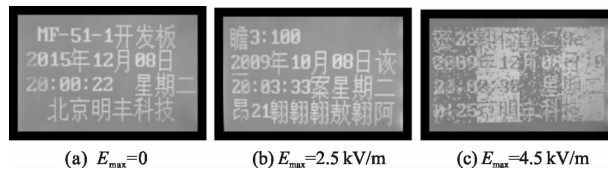


图 1 不同脉冲峰值场强 E_{max} 下显示屏图像

Fig.1 Image of display screen with different pulse peak field strength E_{max}

单脉冲总能量密度(单位: J/m^2)可由下式表示:

$$j = \frac{1}{\eta_0} \int_0^{\infty} |E(t)|^2 dt = \eta_0 \int_0^{\infty} |H(t)|^2 dt \quad (1)$$

由公式(1)计算可得, 脉冲峰值场强控制在 2.5 kV/m, 即能量密度 j 小于 $0.55\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 使单

片机正常工作,与参考文献[12]给出的电子系统对不同功率密度 HPM 的效应描述基本一致。

2 实验结果及讨论

为了验证等离子体对高功率微波的防护性能,下面进行等离子体对高功率微波的透射衰减实验。

实验测试系统由 6 GHz 高功率微波源、喇叭天线、示波器、两层柱状等离子体阵列以及等离子体放电电压调节系统等组成,示意图及实物图分别如图 2、图 3 所示。需要指出的是,文中实验是在高功率微波未激发等离子体非线性效应时进行的。两种电场极化方向, TM 极化、TE 极化如图 2 所示。

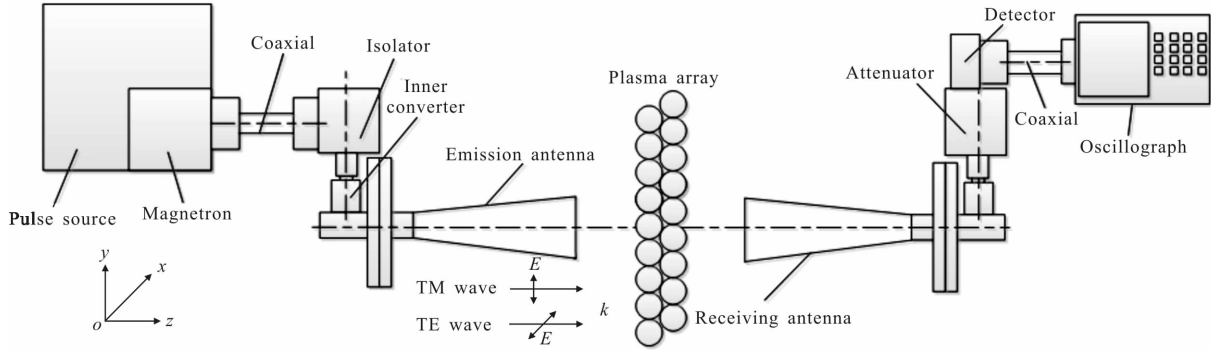


图 2 柱状等离子体阵列透射衰减测量系统

Fig.2 Transmission attenuation measurement system of the cylindrical plasma array

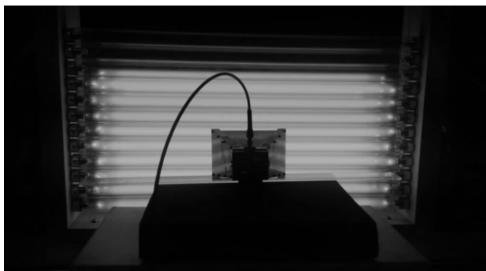


图 3 测量系统实物图

Fig.3 Physical map of the measurement system

两层等离子体时,透射峰值降至干扰阈值,恰能满足电子设备的防护要求。

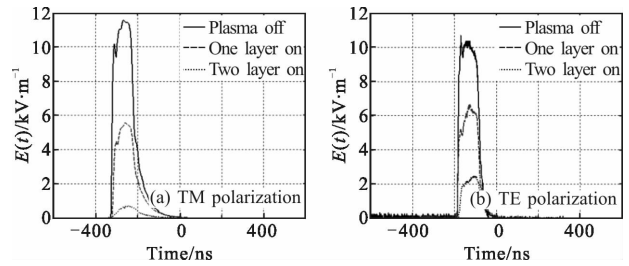


图 4 不同极化条件下透射波形图

Fig.4 Transmission wave with different polarization

2.1 极化方向对高功率微波透射衰减的影响

图 4 分别为 TM、TE 极化条件下,原始脉冲峰值场强为 11.5 kV/m 时,一层、二层等离子体阵列启动前后,测得的透射波形图。可以看出,随等离子体层数增多,透射波形整体下移,脉冲总能量减小,防护效果增强。TM 极化条件下,一层等离子体可以使峰值场强降至 5.5 kV/m,但此时仍大于电子设备的损伤阈值,达不到防护效果;当增加到两层等离子体时,透射峰值场强低于 1 kV/m,小于电子设备的干扰阈值,从而可以实现对电子设备的防护。TE 极化条件下,一层等离子体可以使峰值电场强度降至 6.9 kV/m,同样大于电子设备的损伤阈值,当增加到

由公式(1)得,透射脉冲总能量衰减为:

$$\text{Attenuation/dB} = 10 \lg(j/j_0) = \frac{1}{\eta_0} \int_0^{+\infty} |E(t)|^2 dt / \frac{1}{\eta_0} \int_0^{+\infty} |E_0(t)|^2 dt = \int_0^{+\infty} |E(t)|^2 / |E_0(t)|^2 dt \quad (2)$$

由公式(2)可得, TM、TE 极化下,双层等离子体对电磁波的能量衰减分别为 20.9 dB 和 14.7 dB,而单层等离子体衰减分别只有 6.6 dB 和 4.9 dB。这可能是由于采用双层结构后,透过第一层等离子体的电磁波会被两层等离子体来回反射,且在传输过

程中多次被等离子体吸收衰减,从而屏蔽效果增强。图 5 给出了两种极化条件下,经傅里叶变换得到的归一化透射脉冲频谱。由于脉冲频谱在 6 GHz 左右 100 MHz 范围对称,简单起见,只讨论大于 6 GHz 部分。从频谱图中可以看出,高功率微波脉冲的频谱特性十分丰富,入射脉冲频段在 6 GHz 为中心,左右各 50 MHz,在 50 MHz 以外强度非常微弱,可忽略。观察其规律,可以发现脉冲主波瓣在 0~10 MHz,次波瓣在 10~20 MHz,第三波瓣在 20~30 MHz,第四波瓣在 30~40 MHz,第五波瓣在 40~50 MHz。从图中可以看出,第一波瓣,也就是基频能量绝对占优,占脉冲总能量 90%以上,因此这是笔者防护的重点。

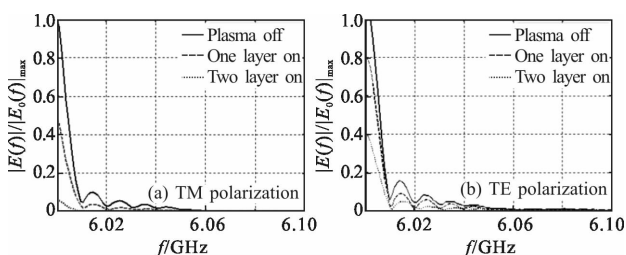


图 5 不同极化条件下透射频谱图

Fig.5 Transmission spectrum with different polarization

图 6 给出了两种极化条件下的传输系数,描述了等离子体在不同频率上的屏蔽效果。

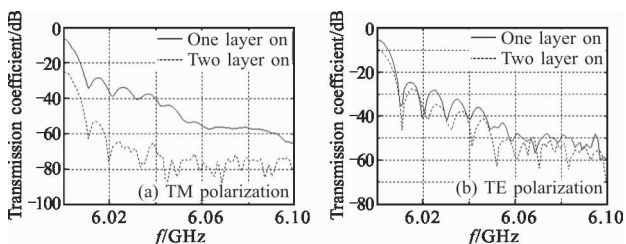


图 6 不同极化条件下传输系数

Fig.6 Transmission coefficient with different polarization

从图 5、6 中均可以看出,相同层数时,TM 极化时对电磁脉冲的屏蔽效果要优于 TE 极化时的情况,这一点与时域分析一致。两层等离子体时,无论何种极化,整个频段衰减量均达 10 dB 以上,对高功率微波具有较好的屏蔽效果。

综上所述,两种极化条件下等离子体屏对入射微波均具有较好的衰减效果,但在 TM 极化时比 TE 极化时衰减效果要好。这是因为当电磁脉冲作用于等离子体时,在 TM 极化时,等离子体对入射电磁脉

冲不仅存在反射和碰撞吸收,还存在线性模转换共振吸收,故造成较大衰减;而在 TE 极化时没有线性模转换共振吸收,同时受放电腔约束,靠近放电腔壁的电子密度接近于 0,而此时电场矢量平行于放电腔轴向,电场容易直接透过等离子体而未与之发生相互作用,因此衰减较弱^[13]。

2.2 电子密度对高功率微波透射衰减的影响

图 7 为原始峰值场强 11.5 kV/m、TM 极化时,双层等离子体阵列在不同放电电压下对脉冲的透射衰减波形图。可以看出,随电压增大,透射脉冲波形整体下移,脉冲总能量减小,屏蔽效果增强。

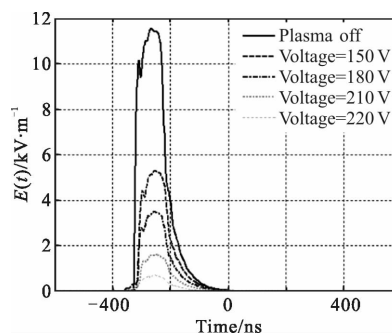


图 7 TM 极化条件下透射波形图

Fig.7 Transmission wave with TM polarization

为了研究电子密度对衰减的影响,利用双频点微波透射衰减诊断法对电子密度进行诊断,结果如表 1 所示。应该指出,由于放电产生等离子体为高频放电,因此等离子体电子密度有一定波动性,所以诊断结果实际上是管内平均电子密度。

表 1 电子密度诊断结果

Tab.1 Diagnosis results of electron density

Discharge voltage/V	Electron density/m ⁻³	Discharge voltage/V	Electron density/m ⁻³
120	9.5×10 ¹⁶	200	1.8×10 ¹⁷
140	1.1×10 ¹⁷	220	2.1×10 ¹⁷
160	1.3×10 ¹⁷	240	2.5×10 ¹⁷
180	1.5×10 ¹⁷		

由图 7 和表 1 得到脉冲总能量衰减随电子密度变化的关系曲线,如图 8 所示。结合图 7 可以发现,当需要达到的场强小于阈值 2.5 kV/m 时,相应的等离子体放电电压需要增加到 200 V,此时总能量衰减达 16 dB,从而保护电子设备不受干扰或损伤。

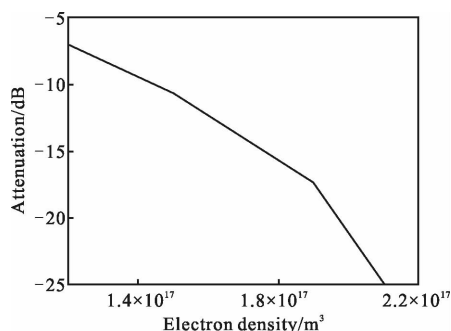


图 8 总能量透射衰减随电子密度变化关系

Fig.8 Total energy transmission attenuation with electron density

从图 8 可以看出,随电子密度的增大,能量衰减呈抛物线趋势增大,这是由等离子体对入射脉冲的反射和吸收造成的。当等离子体密度较低时,频率越低,被等离子体反射的低频能量越少,高频能量进入等离子体,吸收作用较小,因而总的透射能量增大。随着等离子体电子密度增大,频率增大,被等离子体反射的低频能量增大,进入等离子体的高频能量减少,吸收作用增强,从而总的透射能量减小,这与非磁化等离子体的高通特性是一致的^[14]。同时推测,如果进一步增大等离子体电子密度,则衰减效果进一步提高。

3 结 论

文中设计了一种双层等离子体电磁脉冲防护结构,并综合放电所产生等离子体的密度分布特征,实验研究了双层等离子体对 6 GHz 高功率微波脉冲的防护效果,实验结果表明, TM 极化时的防护效果要优于 TE 极化时的防护效果;两种极化均可使透射峰值场强小于电子设备的干扰阈值 2.5 kV/m; TM、TE 极化时等离子体对高功率微波脉冲的透射能量衰减最高可达 20.9 dB 和 14.7 dB。结果还表明:由于多次反射的存在,即使等离子体电子密度不是太高,也可实现对高功率微波的强衰减。文中所得相关实验结果对于高功率微波和电磁脉冲防护具有参考意义。同时应当指出,文中仅讨论了垂直入射情况下双层等离子体防护强脉冲的情况,对于多层防护及不同角度入射的防护效果仍需做进一步研究。

参考文献:

[1] Wang Peng, Li Wanyu. Summary of research on high power electromagnetic effect and protection technology [J]. *Fire Control Radar Technology*, 2012, 41(1): 81–83. (in Chinese)

[2] Wang Xi, Bian Jintian, Li Hua, et al. Experiment on damage in K9 glass due to repetition rate pulsed CO₂ laser radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1204–1207. (in Chinese)

[3] Li Yong, Wang Xiao, Yi Ming, et al. Countermeasure technology and threats against space-based photoelectric imaging and remote sensing device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(6): 631–635. (in Chinese)

[4] Macheret S O, Shneider M N, Murray R C. Ionization in strong electric fields and dynamics of nanosecond-pulse plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(2): 023502–023511.

[5] Destler W W, DeGrange J E, Fleischmann H H, et al. Experimental studies of high-power microwave reflection, transmission, and absorption from a plasma-covered plane conducting boundary[J]. *Appl Phys*, 1991, 69(9): 6313–6318.

[6] Boeuf J, Chaudhury B, Zhu G. Theory and modeling of self-organization and propagation of filamentary plasma arrays in microwave breakdown at atmospheric pressure [J]. *Physics Review Letters*, 2010, 104(1): 015002.

[7] Zhao Pengcheng, Guo Lixin, Li Huimin. Transmission, reflection and absorption of 110 GHz high-power microwave in air breakdown plasma [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(3): 512–515. (in Chinese)

[8] Yang Geng, Tan Jichun, Sheng Dingyi, et al. Protection against power microwave using plasma [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2008, 28(1): 90–93. (in Chinese)

[9] Yuan Zhongcai, Shi Jiaming. Theoretical and numerical studies on interactions between high-power microwave and plasma[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(9): 095202. (in Chinese)

[10] Zhou Qianhong, Dong Zhiwei, Chen Jingyuan. Modeling of plasma pattern formation in 110GHz microwave air breakdown [J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(12): 125202. (in Chinese)

[11] Wen Yinghong, Zhou Kesheng, Cui Yong, et al. *Electromagnetic Field and Electromagnetic Compatibility*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 102–110. (in Chinese)

[12] Zhou Jiequn. High-power microwave weapon systems [J]. *Shipborne Weapons*. 2001(4): 33–37. (in Chinese)

[13] Cheng Li, Shi Jiaming, Wang Jiachun, et al. Influence of one-layer cylindrical plasma array on microwave transmission attenuation [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science of Technology*, 2014, 34(2): 183–185. (in Chinese)

[14] Yuan Zhongcai, Shi Jiaming. Research on EM pulse protection property of plasma-microwave absorptive material-plasma sandwich structure [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2010, 53(12): 3221–3224.