

核电磁脉冲模拟器的电场特性及等离子体阵列的防护性能*

刘洋,程立,汪家春,袁忠才,时家明

(国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽合肥 230037)

摘要:强电磁脉冲通过电子设备表面耦合进入内部将产生显著的破坏作用,而等离子体作为一种特殊的电磁介质,具有屏蔽强电磁脉冲的能力,因此基于等离子体的强电磁脉冲防护研究具有重要意义。利用CST软件仿真分析了核电磁脉冲模拟器工作空间的电场分布。进行了核电磁脉冲对单片机的干扰和破坏效应辐照研究,得到了其对MF-51-1型单片机的干扰和破坏阈值分别在10 kV/m和18 kV/m左右。实验研究了单层等离子体阵列对核电磁脉冲的防护性能,能量衰减均在10 dB以上。实验结果表明,等离子体具有强电磁脉冲防护的能力。

关键词:核电磁脉冲;等离子体阵列;防护;电场;模拟器

中图分类号:O539 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2018)04-041-06

Electric field characteristics of nuclear electromagnetic pulse simulator and protection performance of plasma array

LIU Yang, CHENG Li, WANG Jiachun, YUAN Zhongcai, SHI Jiaming

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

Abstract: Strong electromagnetic pulse may cause serious damage once it is coupled into the interior of the electronic system. As a kind of special electromagnetic medium, the plasma has the ability of shielding strong electromagnetic pulse. Therefore, electromagnetic pulse protection technology based on the plasma is of practical significance. The electric field distribution in work space of the nuclear electromagnetic pulse simulator was simulated and analyzed by the CST software. The interfering and damaging effect of the single-chip microcomputer under irradiation of the nuclear electromagnetic pulse was studied, the results showing that the interfering and damaging thresholds of the nuclear electromagnetic pulse to MF-51-1 MCU are 10 kV/m and 18 kV/m respectively. The protection performance of the one-layer plasma array to the nuclear electromagnetic pulse was experimentally studied, and the energy attenuation value can reach up to 10 dB. The research results show that the plasma has the protection ability against strong electromagnetic pulse.

Key words: nuclear electromagnetic pulse; plasma array; protection; electric field; simulator

近年来,随着科学技术的进步,各种电气、电子设备及系统不断涌现,使得电磁干扰与防护问题成为人们关注的重点。比如,随着电磁脉冲武器的出现,战场空间的电磁环境日趋恶劣,使装备面临着重大的电磁威胁^[1-3];在电力系统中,随着电网的扩大、电压等级的提高,电力系统内瞬态干扰越来越强,例如高压开关操作、雷电、高空核爆炸产生的强电磁脉冲等^[4];微电子和计算机技术朝着高频、高灵敏度、大规模集成化的方向发展,易受外在干扰,进而造成设备无法正常工作,甚至造成元件或设备的损坏^[5-7]。

等离子体作为一种特殊的电磁介质,具有屏蔽强电磁脉冲的能力。近年来,国内外学者对高

功率微波、强电磁脉冲等与等离子体的相互作用进行了大量的理论与实验研究。Destler等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^[8]。石宝凤等利用流体模型研究高功率微波气体击穿时发现,由于高密度等离子体对微波的强烈反射使微波在朝向波源的区域形成驻波,在电场较高的区域电离率很高,当电子扩散到该区域时将形成较高密度的等离子体,导致放电等离子体在空间呈现离散分布^[9]。Boeuf等将电子扩散系数引入电子流体模型,仿真得到等离子体的动力学特性并且与实验结果相符^[10]。董焯等研究时发现,随着前端上游传输微波场强靠近,微

* 收稿日期:2017-09-08

基金项目:国家863计划资助项目(2015AA0392)

作者简介:刘洋(1991—),男,山东东营人,博士研究生,E-mail:LiuYang_eei@163.com;

时家明(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:shijiaming66@126.com

波窗内侧表面开始发生击穿电离现象。初始阶段的等离子体构型接近球形,随着时间推进,等离子体电离增殖,等离子体构型为“蘑菇”形状^[11],这与 Boeuf 等研究的 100 GHz 微波大气电离三维电磁流体模拟结果类似^[12]。

在进行电磁脉冲防护研究时,一般选用核电磁脉冲模拟器^[13]作为脉冲源,而只有掌握模拟器的空间电场分布,才能准确设计并进行相关实验。因此,本文首先仿真分析了模拟器空间电场分布;然后,依据其电场特性确定实验思路,实验研究了核电磁脉冲照射下单片机的干扰和损坏效应,得到了相应的干扰和破坏阈值;最后,搭建核电磁脉冲与等离子体相互作用的实验系统,从不同角度研究了等离子体阵列对核电磁脉冲的防护效果。

1 模拟器电场特性仿真分析

核电磁脉冲模拟器外形结构及仿真模型如图 1 所示,由脉冲源、前过渡段、平行板段、后过渡段、终端匹配负载等组成。利用电磁仿真软件 CST 中的微波工作室(一种集时域和频域算法为一体的,系统级电磁兼容及通用高频无源器件三维电磁仿真软件)仿真分析了其电场特性。其中,平行板段的宽度 $w = 120\text{ cm}$,高度 $h = 100\text{ cm}$,长度 $l = 100\text{ cm}$,前过渡段长度 $l_1 = 121.8\text{ cm}$,后过渡段长度 $l_2 = 112\text{ cm}$ 。

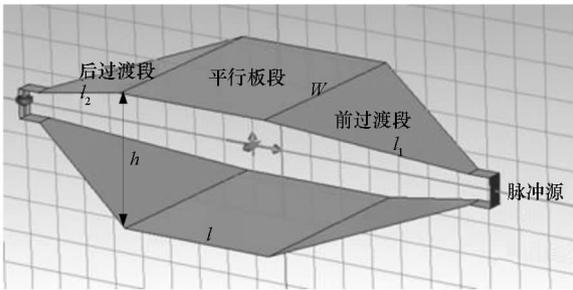


图 1 核电磁脉冲模拟器的外形结构及仿真模型
Fig. 1 Structure and simulation model of the NEMP simulator

模拟器的空间电磁特性主要是由脉冲源决

定^[14-16],为了能够在模拟器的工作空间产生幅值大约为 50 kV/m 的电磁环境,考虑到模拟器工作空间的高度为 1 m,在模拟器的源端加载峰值为 50 kV 的双指数形式的电磁脉冲源,其电场强度随时间的变化为:

$$E(t) = A_0 \cdot k \cdot [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (1)$$

其中, A_0 为脉冲峰值场强 50 kV/m,取补偿因子 $k = 1.3$, $\alpha = 4 \times 10^7\text{ s}^{-1}$, $\beta = 6 \times 10^8\text{ s}^{-1}$ 。

由于等离子体是有源装置,需接入电缆提供能量,同时需要通过控制电路控制其开关,而强电磁脉冲可能会对电路系统产生破坏。因此,进行电磁脉冲屏蔽实验时,借鉴一般材料的测试方法,利用带有开口的屏蔽柜进行测试,同样对放置屏蔽柜时工作空间的电场特性进行了仿真。考虑到电磁脉冲入射时,两种情况的威胁可能最大(屏蔽柜内场强最大),分别是屏蔽柜开口竖直向上和开口朝向脉冲源,如图 2 所示,因此主要对这两种情况进行分析。

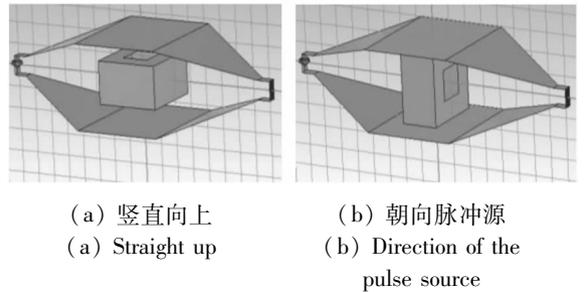
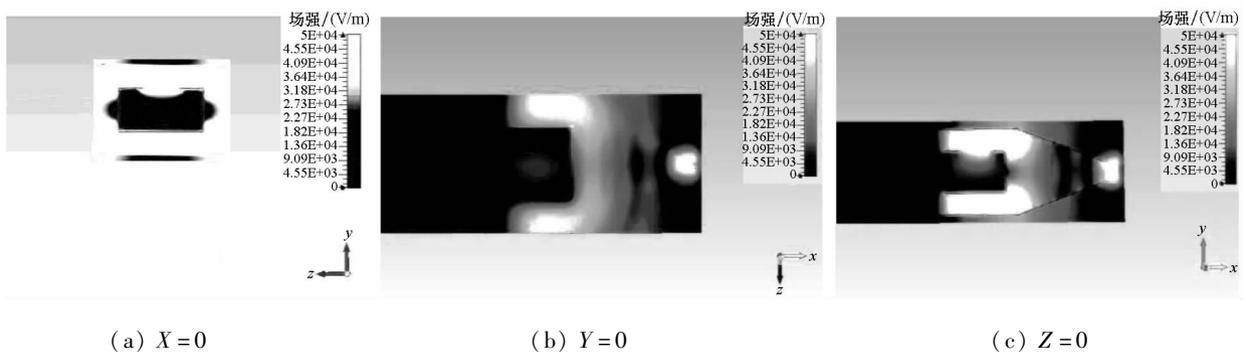


图 2 模拟器内放置不同开口方向的屏蔽柜
Fig. 2 Diagram of the shielding cabinet with different direction's apertures in simulator

为了得到强脉冲入射到屏蔽柜时的电场特性,仿真了 $X=0$ 、 $Y=0$ 和 $Z=0$ 平面在 7 ns 时刻的空间电场分布,如图 3 所示。其中,图 3(a) ~ (c) 为开口竖直向上时的仿真结果,图 3(d) ~ (f) 为开口朝向脉冲源时的仿真结果。

从图 3 看出,两种情况下,模拟器电场分布发生了较大变化,屏蔽柜内部场强最大处在开口附近,只有 $3.6 \times 10^4\text{ V/m}$ 左右。放置屏蔽柜后,均



(a) $X=0$

(b) $Y=0$

(c) $Z=0$

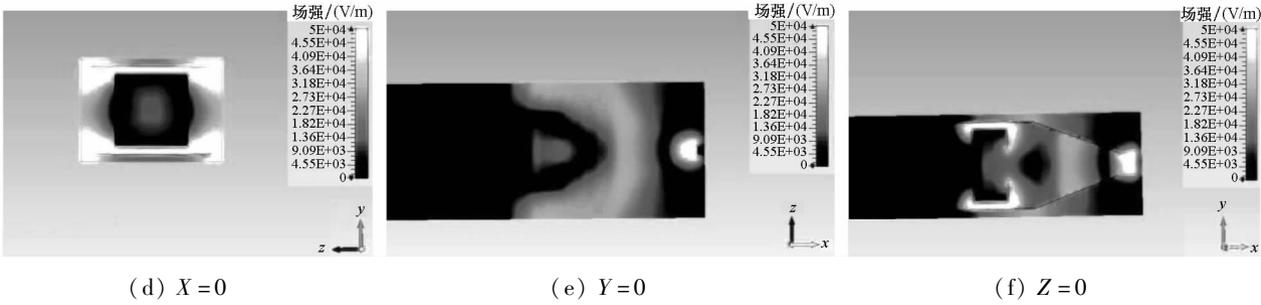


图3 7 ns时刻模拟器空间电场分布
Fig.3 Distribution of E-field in simulator at 7 ns

出现沿Y方向屏蔽柜两侧场强增大,X方向场强减小的现象。这可能由于增加屏蔽柜后,与未放置屏蔽柜时相比,电压不变,但是上下平行板距离减小,造成了场强增大。当屏蔽柜开口向上时,与自由空间相比,原点处场强变小,只有 2.8×10^4 V/m,远小于未放置屏蔽柜时的 5×10^4 V/m。当屏蔽柜开口向右时,原点处的时域电场波形与屏蔽柜开口向上时的电场特性基本一致。本节仿真获得的模拟器工作空间的瞬态电磁场分布,为后续开展电磁脉冲干扰和防护实验奠定了基础。

2 实验

2.1 电磁脉冲对电子元器件的干扰及破坏实验

由仿真结果可知,无论是否放置屏蔽柜,模拟器工作空间均具有较强的电磁脉冲。为了验证其对电子系统的破坏能力,以MF-51-1型单片机为例,进行了核电磁脉冲对单片机的干扰和损坏效应辐照研究,得到了其对单片机的干扰和破坏阈值。

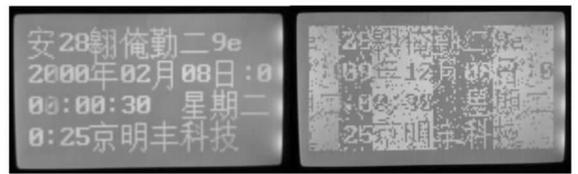
实验用核电磁脉冲模拟器的脉冲峰值电场强度为50 kV/m,上升沿为2.5 ns左右,半高宽为25 ns左右。表1给出了反复实验后,不同入射脉冲峰值场强下的单片机状态及效应。

表1 不同入射脉冲峰值场强下的单片机状态及效应

Tab.1 State and effect of the SCM in different incident E-field intensities

峰值场强/ (kV/m)	单片机状态	效应
1	正常工作	
5	正常工作	
9	正常工作	
10	显示屏字符混乱	电路失常
15	显示屏字符混乱	电路失常
17	显示屏字符混乱	电路失常
18	单片机停止工作	电路损伤

图4(a)为MF-51-1型单片机受到核电磁脉冲照射时,显示屏出现字符混乱、日期及数字不断跳变的情形。这是由于核电磁脉冲通过“前门”或“后门”耦合,经过数据总线导入CPU内部,从而改写PC值进而导致电路失常,引起程序跳转^[17]。经测试,此时脉冲峰值场强为10 kV/m,因此得到MF-51-1型单片机干扰阈值在10 kV/m左右。图4(b)为持续增大照射强度,直至单片机停止工作的情形。此时脉冲耦合进入内部电路,由于脉冲场强幅值较高,同时有效辐照时间相应变长,使得单片机的程序计数器PC内容被彻底改变,造成单片机出现死机现象。此时单片机已经被破坏,不能恢复,可测得此时脉冲峰值场强为18 kV/m,因此得到MF-51-1型单片机破坏阈值在18 kV/m左右。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10 kV/m以下。



(a) $E = 10$ kV/m (b) $E = 18$ kV/m

图4 不同脉冲峰值场强下单片机显示屏图像

Fig.4 Image of the SCM display in different E-field intensities

2.2 等离子体对核电磁脉冲的防护性能实验

为了考察等离子体对强电磁脉冲防护的性能,进行等离子体对核电磁脉冲的屏蔽效能实验。实验时,将屏蔽柜置于工作空间中心,留有30 cm × 30 cm的开口放置等离子体阵列。采用圆柱形放电腔(两端各有一个电极,两者交替作为阴、阳极),通过高频放电使阴极发射电子,电子被外电场加速,运动的电子与气体原子碰撞时,电子动能转交给原子使其电离,从而产生单个柱状等离子

体单元,放电单元紧密排列形成等离子体阵列。为了保证测量得到稳定的脉冲透射衰减曲线,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 $d = 2.5 \text{ cm}$, 长度 $l = 60 \text{ cm}$, 填充某混合气体且气压在 $p \text{ Torr}$, 加在放电管两端的放电频率为 $f \text{ kHz}$ 时,放电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 $120 \sim 240 \text{ V}$ 可调,利用等离子体双频点微波透射衰减诊断法可得,等离子体电子密度在 $0.9 \times 10^{17} \sim 2.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 。实验中,等离子体放电电压分别取 100 V 、 150 V 和 220 V ,相应的等离子体电子密度分别为 $8.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 、 $1.2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 和 $2.1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 。

核电磁脉冲模拟器输入电压设为 50 kV ,经测试,入射到等离子体阵列上的电磁脉冲波形如图 5 所示,其峰值场强接近 60 kV/m 。

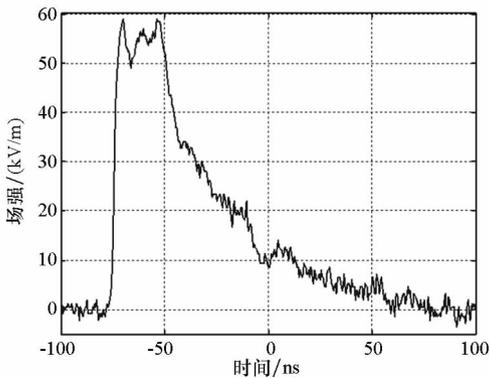


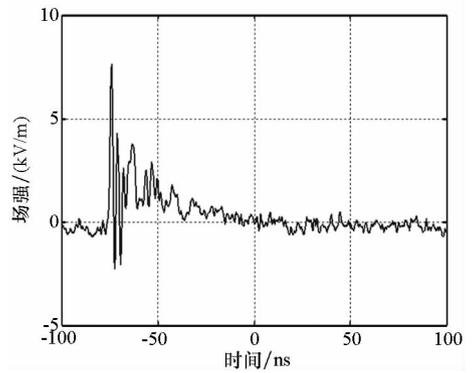
图 5 入射到等离子体阵列的电磁脉冲波形
Fig. 5 Waveform of the incident electromagnetic pulse on the plasma array

通过分析示波器在等离子体不同放电电压时接收到的信号的大小来考察等离子体阵列对强电磁脉冲的屏蔽效果。图 6 给出等离子体放电电压不同时透射脉冲波形曲线。

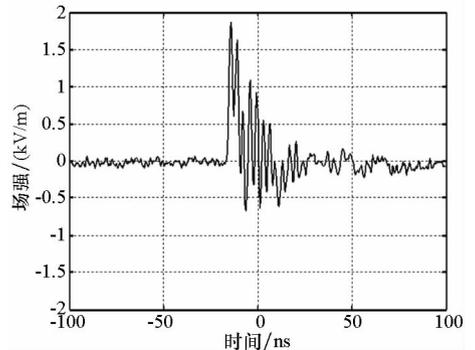
由图 6 可知,输入电压分别为 100 V 、 150 V 、 220 V 时,透射脉冲峰值场强分别为 2 kV/m 、 1 kV/m 、 0.5 kV/m ,与未开启等离子体时(峰值场强为 7.5 kV/m)对比可知,透射脉冲场强整体减小,衰减增大,屏蔽效能增强,分别为 11.5 dB 、 17.5 dB 、 23.5 dB 。因此,实际应用中,可采用增大输入电压的办法实现对入射脉冲较大的衰减,保护后方电子设备不受破坏。由单个脉冲总能量密度公式

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

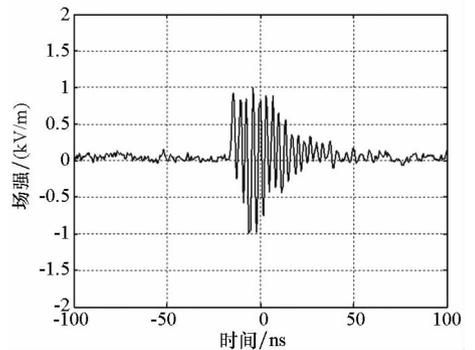
可得,脉冲总能量衰减随电子密度的变化曲线,如图 7 所示。



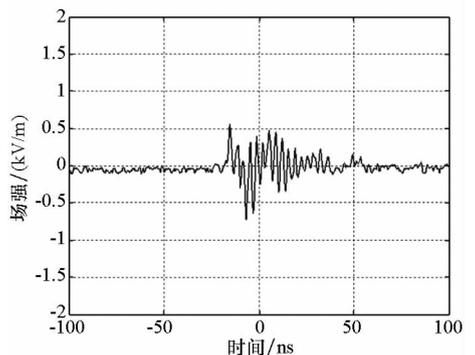
(a) $U = 0 \text{ V}$



(b) $U = 100 \text{ V}$



(c) $U = 150 \text{ V}$



(d) $U = 220 \text{ V}$

图 6 不同放电电压时的透射脉冲波形
Fig. 6 Dependence of transmission waveform on the discharge voltage

可以从图 7 看出,随着等离子体电子密度逐渐升高,透射衰减整体增大,防护效果增强,最大衰减接近 30 dB ,相当于该脉冲只有千分之一

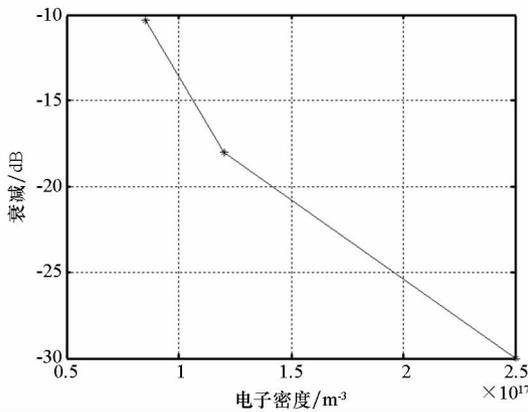


图7 脉冲总能量衰减随电子密度的变化曲线
Fig. 7 Dependence of total energy attenuation on the electron density

的能量可以透过等离子体。这可以解释为随等离子体放电电压升高,内建电场增大,从而与中性粒子碰撞概率增大,提高了等离子体电子密度,从而增强了对入射脉冲的反射与吸收,使透射能量减弱。因而,对于等离子体阵列,通过对放电电压的调节,可以较好地控制等离子体电子密度,达到防护目的。

3 结论

本文仿真分析了核电磁脉冲模拟器工作空间的电场特性,利用设计的等离子体电磁脉冲防护结构,结合放电所产生等离子体的密度分布特征,实验研究了等离子体阵列对核电磁脉冲的防护效果,主要结论如下:在工作空间中放置屏蔽柜的两种情况下,内部场强均发生了极大变化,使得原点处场强只有 2.8×10^4 V/m,远远小于未放置屏蔽柜时的 5×10^4 V/m。核电磁脉冲通过“前门”或“后门”耦合进入 CPU 内部造成电路失常甚至损伤,出现停止工作的现象;其对 MF-51-1 型单片机的干扰阈值在 10 kV/m 左右,破坏阈值在 18 kV/m 左右。单层等离子体阵列对核电磁脉冲的能量屏蔽基本在 10 dB 以上。增加等离子体放电电压有利于增大等离子体电子密度;由于电子与中性粒子的强碰撞作用,当电子密度为 $2.5 \times 10^{17} m^{-3}$ 时,等离子体阵列对核电磁脉冲的衰减可达 30 dB,从而实现对后方电子设备的电磁脉冲防护。

目前,基于等离子体的强电磁脉冲防护技术依然存在许多问题,比如,不同角度入射时等离子体的防护效果、等离子体的具体参数及应用场合、等离子体保护电子设备的具体样式。相信在未来,随着研究的不断深入和技术的不断成熟,等离

子体电磁脉冲防护技术将逐步走向实用化,结合其他手段,可以实现对电子设备较为全面的电磁防护。

参考文献 (References)

- [1] Rasch J, Anderson D, Lisak M, et al. Gas breakdown in inhomogeneous microwave electric fields [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2009, 42(20): 205203.
- [2] Yuan Z C, Shi J M. Research on EM pulse protection property of plasma-microwave absorptive material-plasma sandwich structure [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2010, 53(12): 3221-3224.
- [3] Yuan Z C, Shi J M. Theoretical and numerical studies on interactions between high-power microwave and plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 3459-3467.
- [4] 李云伟, 王泽忠, 卢斌先, 等. 电磁脉冲模拟器仿真与实验研究 [J]. *高电压技术*, 2007, 33(1): 128-131. LI Yunwei, WANG Zezhong, LU Binxian, et al. Simulation and experimental study of electromagnetic pulse simulator [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(1): 128-131. (in Chinese)
- [5] Rasch J, Semenov V E, Anderson D, et al. On the microwave breakdown stability of a spherical hot spot in air [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2011, 43(32): 325204.
- [6] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, et al. Pulsed microwave damage trend of bipolar transistor as a function of pulse parameters [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(2): 028502.
- [7] Bagel H, Yllmaz A E, Jin J M, et al. Fast and rigorous analysis of EMC/EMI phenomena on electrically large and complex cable-loaded structures [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(2): 361-381.
- [8] 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]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(9): 6313-6318.
- [9] 石宝凤, 林文斌, 赵朋程, 等. 等效电离参数对 110 GHz 高功率微波放电等离子体的影响 [J]. *中国科学: 物理学 天文学*, 2015, 45(2): 025201. SHI Baofeng, LIN Wenbin, ZHAO Pengcheng, et al. Effect of effective ionization parameters on the 110 GHz high-power microwave discharge plasma in air [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2015, 45(2): 025201. (in Chinese)
- [10] Boeuf J P, Chaudhury B, Zhu G Q. 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.
- [11] 董烨, 周前红, 杨温渊, 等. 微波输出窗内表面闪络击穿 3 维全电磁等离子体流体模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(3): 15-23. DONG Ye, ZHOU Qianhong, YANG Wenyuan, et al. 3D fully electromagnetic field and plasma fluid simulation of inner

- surface flashover and breakdown on microwave window [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(3): 15 – 23. (in Chinese)
- [12] Kourtzanidis K, Boeuf J P, Rogier F. Three dimensional simulation of pattern formation during high-pressure freely localized microwave breakdown in air [J]. Physics Plasma, 2014, 21(12): 123513.
- [13] Mao C G, Zhou H, Chen W Q, et al. Early-time high-altitude electromagnetic pulse environment simulation with a bicone-cage antenna [J]. China Communications, 2013, 10(7): 12 – 18.
- [14] 任兴荣, 柴常春, 马振洋, 等. 基极注入强电磁脉冲对双极晶体管的损伤效应和机理 [J]. 物理学报, 2013, 62(6): 464 – 469.
REN Xingrong, CHAI Changchun, MA Zhenyang, et al. The damage effect and mechanism of bipolar transistors induced by injection of electromagnetic pulse from the base [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 464 – 469. (in Chinese)
- [15] Bailey V, Carboni V, Eichenberger C. A 6 – MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(10): 2554 – 2558.
- [16] Ahmed S, Raju D, Chaturvedi S, et al. Modal analysis for a bounded-wave EMP simulator-part I: effect of test object [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(1): 171 – 182.
- [17] 侯民胜, 刘尚合, 王书平. 单片机系统在核电磁脉冲辐照下的效应研究 [J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(5): 623 – 626.
HOU Minsheng, LIU Shanghe, WANG Shuping. Study on irradiation effects of nucleus electromagnetic pulse on single chip computer system [J]. High Power Laser and Beams, 2001, 13(5): 623 – 626. (in Chinese)