0254-6124/2013/33(6)-659–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Quan Ronghui, Zhang Zhenlong, Han Jianwei. Experimental study of frequency spectrum characteristics in spacecraft dielectric discharging. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(6): 659-663

航天器介质放电脉冲频谱特征实验研究 *

全荣辉[1,2] 张振龙[2] 韩建伟[2]

1(南京航空航天大学航天学院 南京 210016)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 空间电子辐射环境下, 航天器介质的充放电效应是威胁航天器安全的重要因素. 介质放电现象除与材料参数及构型相关外, 还与空间电子环境密切相关. 本文通过电子枪和 Sr^{90} 放射源在地面实验装置上模拟空间电子辐照环境, 测试了环氧树脂、聚四氟乙烯、聚酰亚胺等常见空间材料在不同温度、不同电子能量和电子束流强度影响下的放电脉冲, 并对放电电流脉冲和电场脉冲进行频谱分析. 实验分析结果表明, 介质材料的放电电流脉冲频谱具有明显的单峰结构, 该峰值与材料厚度和入射电子能量相关, 但受材料温度和辐照束流强度影响不大.

关键词 深层放电, 频谱特征, 航天器介质, 电子辐照

中图分类号 V 542

Experimental Study of Frequency Spectrum Characteristics in Spacecraft Dielectric Discharging

QUAN Ronghui[1,2] ZHANG Zhenlong[2] HAN Jianwei[2]

1(*College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016)

2(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Deep dielectric charging and discharging effect is one of the key factors threatening the spacecraft safety. Besides the dielectric and its grounding configuration, deep dielectric discharging is also affected by the electron environment in space. The space dielectrics such as FR4, Teflon and Polyimide were tested in a simulated space radiation environment on ground, and their discharging currents and electrical field pulses were recorded. By analyzing frequency spectrum characteristics of the discharging transients and the effect of dielectric temperature, electron energy and electron beam intensity, a peak frequency in discharging current was discovered. The result shows that the peak frequency varies with the dielectric thickness and electron energy, while no obvious change was observed at different beam intensities or temperatures.

Key words Deep dielectric discharging, Frequency spectrum, Spacecraft dielectrics, Electron irradiation

* 国家自然科学基金项目资助 (41004083)

2013-07-13 收到原稿, 2013-08-25 收到修定稿

E-mail: quanrh@nuaa.edu.cn

0 引言

空间电子辐射环境下, 航天器介质充放电现象一直是威胁航天器安全的重要因素之一 [1−2]. Koons 等对 1973−1999 年间 299 例卫星故障的分类统计结果表明 [3], 由航天器充放电引起的异常占总数的 54.2%. 因此, 做好航天器充放电防护对于卫星的寿命与可靠性具有重要意义.

空间电子入射并沉积到航天器介质上, 当其沉积电荷形成的电场达到介质击穿场强时, 即容易产生放电现象. 航天器介质放电是空间电子引发航天器故障的主要形式, 介质放电除导致材料击穿和电子器件烧毁外, 其放电的电磁脉冲也可引起星载仪器跳变 [4]. 因此, 做好航天器放电脉冲干扰防护对于保障航天器自身安全也具有重要意义.

航天器介质放电的脉冲特征除与介质材料本身构型及材料参数相关外, 还与空间电子辐照环境密切关联. 当前研究热点主要在于航天器介质放电脉冲对卫星器件的影响, 而对于放电脉冲与空间电子环境的关联研究较少 [5−6]. 本文通过地面模拟实验, 测量比较了空间辐照电子能量、束流强度和温度等空间环境因素对环氧树脂、聚酰亚胺和聚四氟乙烯等常用航天器介质材料放电电流脉冲与电场脉冲的影响, 其结果对于提高中国航天器的充放电防护和抗脉冲干扰抑制具有重要参考意义.

1 实验设置

空间电子辐射环境除与轨道高度、地磁纬度等位置参数关联外, 还与空间天气活动密切相关, 是一个动态变化的环境 [7]. 目前对空间电子环境特别是磁暴与亚暴等活动条件下空间电子环境变化规律的了解仍不深入, 加之由于当前实验技术的限制, 在地面上无法完全真实地再现空间电子辐照环境. 空间电子环境的参数包括电子能量、束流强度和能谱特征等, 地面实验主要通过调节上述参数来近似模拟电子辐照环境, 研究各参数对航天器介质充放电过程的影响 [8].

本实验在中国科学院空间科学与应用研究中心的卫星充放电实验模拟装置上进行, 该装置的电子源包括 5~100 keV 电子枪和 Sr^{90} 放射源. 电子枪的能量和束流强度连续可调, 可用于研究能量与束流强度变化对航天器介质放电的影响; Sr^{90} 放射源能谱如图 1 所示, 其与恶劣情况下 GEO 轨道电子能谱接近, 可用于模拟 GEO 轨道电子辐照下航天器介质放电现象 [9]. 实验设置如图 2 所示, 样品采用单面接地方式, 在背电极引出接地导线, 其中, 样品尺寸为 4 cm×4 cm, 厚度为 2 mm. 实验样品置于温控台上, 温度调节范围为 −60°C~100°C. 实验期间采用罗氏线圈和电场脉冲仪分别监测介质放电的电流脉冲和电场脉冲信号, 实验真空度高于 5×10^{-4} Pa.

2 实验结果与分析

实验分别测试了环氧树脂 (FR4)、聚四氟乙烯 (Teflon) 和聚酰亚胺 (Kapton) 等材料在不同温度、不同电子能量和电子束流强度辐照条件下的放电电流和电场脉冲波形. 典型的放电电流与电场脉冲 (环氧树脂) 波形如图 3 所示.

由图 3 可见, 放电电流脉冲为单峰震荡衰减信

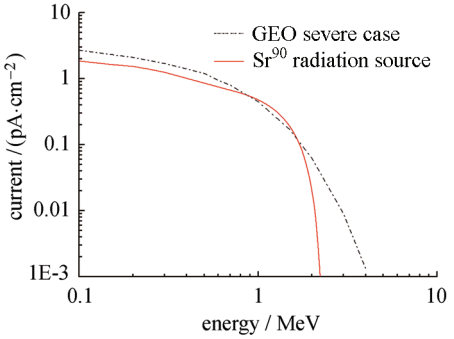


图 1 Sr^{90} 放射源能谱与 GEO 恶劣情况下电子能谱的比较

Fig. 1 Electron energy spectrum of Sr^{90} radiation source and GEO severe case

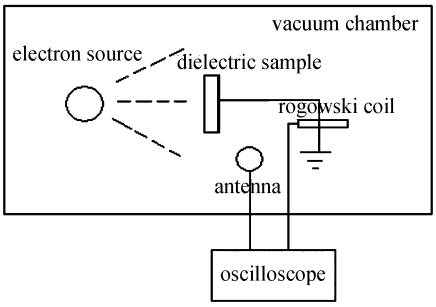


图 2 实验设置原理

Fig. 2 Schematic diagram of experiment setup

号, 峰值强度与电流强度相关, 脉冲宽度在 40 ns 左右; 放电电场脉冲信号类似于 RC 电路放电信号, 其脉冲出现时间比电流信号稍有延迟, 脉冲宽度约 200 ns. 图 4 为放电电流脉冲与电场脉冲对应的频谱信号, 由图 4 可以看到, 放电电流脉冲频谱具有明显单峰结构特征, 在 26 MHz 附近出现特征峰值; 电场脉冲的频谱峰值特征不明显, 随着频率增加, 其强度逐渐减小, 未观测到对应的电流频谱峰值. 由于介质放电电流脉冲时间过短 (约 40 ns), 因此无法形成较强的电场脉冲激励. 此外, 电场信号在真空罐内传播受到影响, 由于真空罐结构及其内部部件的阻碍与反射, 电场信号频谱特征不明显. 相比之下, 电流脉冲信号仅受到接地导线的影响, 干扰因素较少, 其脉冲波形基本保持放电电流波形特征, 因此, 对介质放电的频谱特征分析主要采用放电电流脉冲信号.

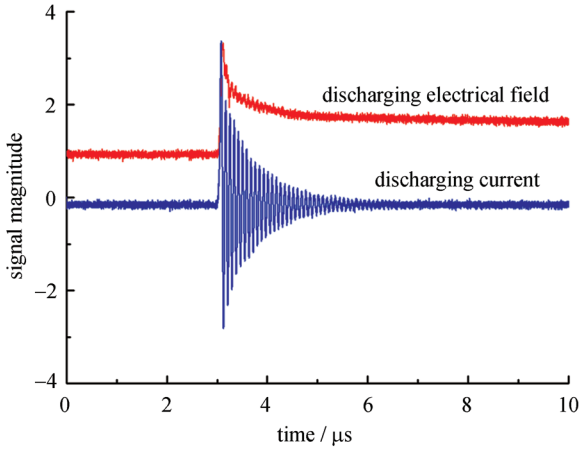


图 3 FR4 放电电流与电场脉冲信号

Fig. 3 Discharging transients of FR4

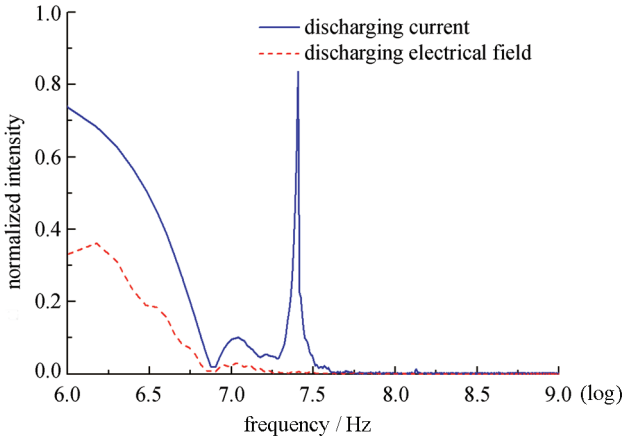


图 4 FR4 放电电流与电场脉冲频谱

Fig. 4 Frequency spectrum of FR4 discharging current and electrical field

图 5 所示为不同电子束流强度辐照下, 环氧树脂 (FR4) 的放电电流脉冲频谱比较, 实验温度为 20°C, 样品厚度为 2 mm. 从图 5 可以看出, 电子束流强度对放电电流脉冲的影响主要在低频部分, 其基本特征不变, 但强度随着束流强度的增加而增强. 由图 5 可见, 放电电流脉冲在 26 MHz 附近, 频率峰值位置并不随束流强度增加而变化. 因此, 图 5 的实验结果表明, 随着电子束流强度的增加, 介质放电强度不断增强, 但是其放电脉冲波形特征和频率峰值位置基本不变.

卫星在不同轨道位置运行过程中, 通常经历不同的温度变化, 实验表明其充电效果会有所差别 [10]. 为比较温度对放电脉冲频谱的影响, 实验分别测试了 −60°C, 0°C, 20°C 和 60°C 下 FR4 的放电电流脉冲频谱, 其结果如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 温度对放电电流脉冲的影响主要在低频部分, 其低频频谱曲线的形状发生了变化, 但电流脉冲的特征峰值位置变化较小, 说明温度对材料本身有所影响, 但对放电物理过程主要参数影响较小, 介质在不同温度条件下的放电现象主要微观过程基本相同.

图 7 给出的是 40 keV 和 60 keV 电子能量辐照下, 厚度为 50 μm 聚酰亚胺 (Kapton) 的放电电流脉冲频谱比较. 在图 7 中, 聚酰亚胺在 40 keV 电子辐照下的频谱峰值为 33.96 MHz, 当电子能量提高至

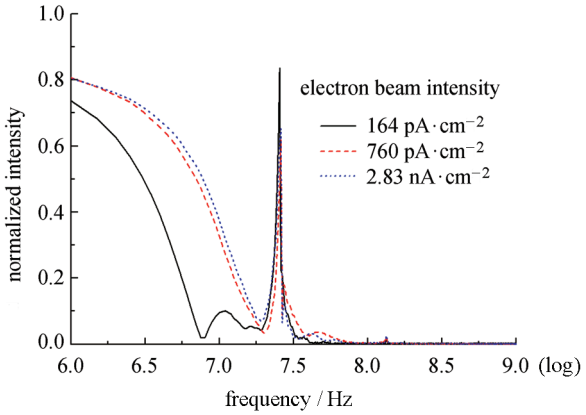


图 5 不同束流强度下 FR4 放电电流脉冲频谱

Fig. 5 Frequency spectrum of FR4 discharging current at different electron beam intensity

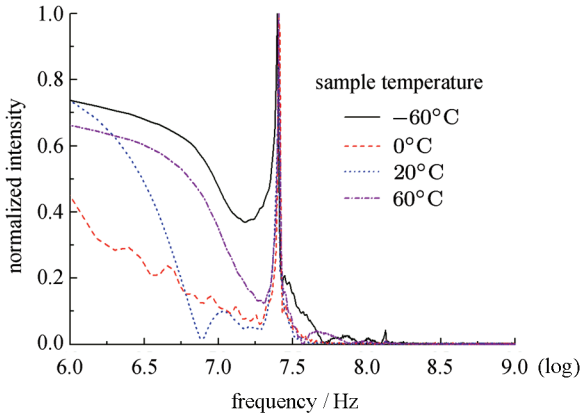


图 6 不同温度下 FR4 放电电流脉冲频谱

Fig. 6 Frequency spectrum of FR4 discharging current at different temperature

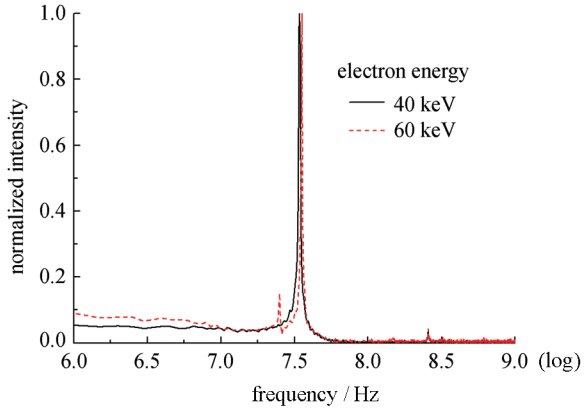


图 7 40 keV 与 60 keV 电子辐照下 Kapton 放电电流脉冲频谱

Fig. 7 Frequency spectrum of Kapton discharging current under 40 keV and 60 keV electron irradiation

60 keV 时, 其频谱峰值位置发生变化, 移动至 35.48 MHz. 不同电子能量在介质中具有不同的沉积深度, 40 keV 与 60 keV 电子在聚酰亚胺中沉积深度分别约为 13 μm 和 20 μm. 因此, 图 7 表明放电电流脉冲频谱特征与入射电子沉积深度相关.

图 8 给出了 40 keV 电子与 Sr^{90} 放射源辐照下放电电流脉冲频谱的比较. Sr^{90} 放射源电子的最大能量为 2.2 MeV, 其能谱结构与 GEO 恶劣情况下的电子能谱相近, 100 keV 以下低能电子为主体, 电子平均能量高于 40 keV. 图 8 中 Sr^{90} 放射源辐照下 FR4 的电流脉冲频谱结构与 40 keV 单能电子辐照下的频

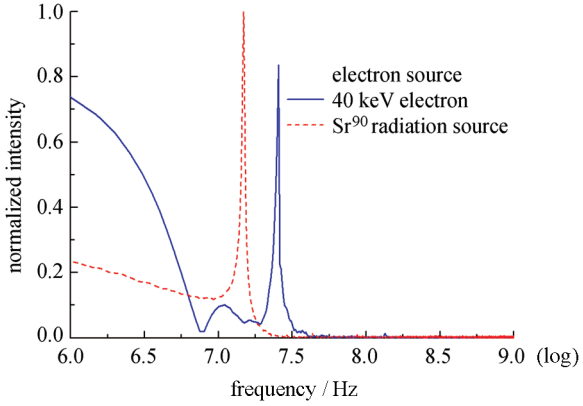


图 8 40 keV 电子与 Sr^{90} 放射源辐照下 FR4 放电电流脉冲频谱

Fig. 8 Frequency spectrum of FR4 discharging current under 40 keV electron beam and Sr^{90} radiation

谱结构基本相同, 但在低能端强度明显降低, 其峰值位置从 25.11 MHz 降低至 14.79 MHz. 因此认为, 介质放电电流脉冲频谱并不随着电子能量的增加而增加, 而是与介质内的电荷沉积分布密切相关.

3 结语

在空间电子辐照环境下, 航天器介质放电脉冲特征除与材料本身参数相关外, 还与空间电子环境密切相关. 通过实验比较分析了电子束流强度、电子能量和温度等环境因素对常见航天器介质放电脉冲频谱的影响, 可以看出, 介质放电电流脉冲频谱具有明显的单峰结构, 其强度随电子束流强度增加而增加, 但频谱分布变化较小; 温度对介质放电电流脉冲频谱的影响主要在低频范围, 对其特征峰值位置无影响; 介质放电电流脉冲频谱的峰值位置与电子能量和介质内电荷分布密切相关.

航天器介质放电现象是十分复杂的物理过程, 目前仍没有准确的理论能够完整描述该过程, 介质放电理论研究多停留在放电路径构建与放电概率模型上 [11−12]. 对航天器介质放电频谱的测量与分析 [13] 有助于理解其放电过程, 抑制航天器介质放电脉冲的电磁干扰. 因此, 在实验的基础上, 构建准确的理论模型, 深入分析航天器介质放电脉冲特征与空间电子环境的物理关系将是需要进一步开展的研究工作.

参考文献

[1] Lanzerotti L J, Breglia C, Maurer D W, *et al*. Studies of spacecraft charging on a geosynchronous telecommunications satellite [J]. *Adv. Space Res.*, 1998, **22**(1):79-82

[2] Frederickson A R, Benson C E, Bockman J F. Measurement of charge storage and leakage in polyimides [J]. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2003, **208**:454-460

[3] H C Koons, J E Mazur, R S Selesnick, *et al*. The impact of the space environment on space systems [C]//Proceeding of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, AFRL-VS-TR-20001578, 20008. 7-11

[4] Huang Jianguo, Han Jianwei. Analysis of a typical internal charging induced spacecraft anomaly [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2010, **59**(4):2907-2913. In Chinese (黄建国, 韩建伟. 航天器内部充放电效应及典型事例分析 [J]. 物理学报, 2010, **59**(4):2907-2913)

[5] Bogorad A L, Likar J L, Voorhees C R, *et al*. Electrostatic discharge induced momentum pulses from charged spacecraft surfaces [J]. *IEEE trans. Nucl. Sci.*, 2006, **53**(6):3607-3609

[6] Velez J C M, Inguimbert V, Roussel J F, *et al*. ESDs on solar cell degradation, modeling and importance of the test setup [J]. *IEEE trans. Plas. Sci.*, 2008, **36**(5):2395-2403

[7] Guo Ce, Xue Bingsen, Lin Zhaoxiang. Approach for predicting the energetic electron flux in Geosynchronous Earth Orbit [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(4):418-426. In Chinese (郭策, 薛炳森, 林兆祥. 地球同步轨道高能电子通量预报方法研究. 空间科学学报, 2013, **33**(4):418-426)

[8] Quan Ronghui, Han Jianwei, Zhang Zhenlong, *et al*. Experimental research and numerical simulation on deep charging for spacecraft dielectrics [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(6):609-614. In Chinese (全荣辉, 韩建伟, 张振龙, 等. 航天器介质材料深层充放电实验与数值模拟 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(6):609-614)

[9] Ryden K A, Morris P A, Rodgers D J, *et al*. Improved demonstration of internal charging hazard using Realistic Electron Environment Facility (REEF) [C]//Proceeding of the 8th SCTC, Huntsville: SCTS, 2003

[10] Quan Ronghui, Zhang Zhenlong, Han Jianwei. Experimental simulation of deep discharging in typical floating conductor structures of spacecraft [J]. *Spacec. Envir. Eng.*, 2011, **28**(1):21-24. In Chinese (全荣辉, 张振龙, 韩建伟. 航天器典型悬浮导体结构深层放电现象的模拟实验研究 [J]. 航天器环境工程, 2011, **28**(1):21-24)

[11] Gu C, Yan P, Shao T, Zhang S C. Fractal simulation of breakdown in dielectric [J]. *High Voltage Eng.*, 2006, **32**(1):1-4

[12] Peruani F, Solovey G. Irurzun I M, Mola E E. Dielectric breakdown model for composite materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(6):66-121

[13] Fasil V K, Karmakar S. Modeling and simulation based study for on-line detection of partial discharge of solid dielectric [C]//10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Bangalore, India, 2012