

Quan Ronghui, Han Jianwei, Zhang Zhenlong, Yan Xiaojuan, Huang Jianguo. Experimental research and numerical simulation on deep charging for spacecraft dielectrics. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(6): 609-614

航天器介质材料深层充放电实验与数值模拟

全荣辉^{1,2} 韩建伟² 张振龙² 闫小娟^{1,2} 黄建国²

¹(中国科学院研究生院 北京 100049)

²(中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要 空间辐射环境中高能电子诱发的介质材料深层充放电效应是威胁航天器安全的重要因素之一。本文采用不同束流强度的电子枪电子,研究了不同厚度的聚酰亚胺薄膜的深层充电过程;利用 Sr90 放射源电子模拟 GEO 轨道高能电子环境,研究了在其辐照下聚甲醛树脂和聚四氟乙烯材料的表面电位变化;实验观测了深层放电产生的电流脉冲和电场脉冲。提出了深层充电模型,较好地模拟了实验测量结果,并且分析了深层充电平衡电位和平衡时间随电子束流强度和介质电阻率的变化规律。实验和数值模拟结果初步揭示了深层充放电效应的特征及规律,表明深层充电现象随着电子束流强度和介质电阻率的增加而趋于明显,介质电阻率是影响深层充电平衡电位和平衡时间的主要因素。

关键词 深层充电; 航天器介质; 电子枪; 放射源

中图法分类号 V 542

Experimental Research and Numerical Simulation on Deep Charging for Spacecraft Dielectrics

QUAN Ronghui^{1,2} HAN Jianwei² ZHANG Zhenlong²

YAN Xiaojuan^{1,2} HUANG Jianguo²

¹(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

²(Center For Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract Deep charging effect caused by high-energy electron irradiation is one of the key factors threatening spacecraft safety under the environment of space radiation. This paper compares the deep charging progress of different thickness polyimide films under different electron beam intensity, simulates the GEO orbit radiation environment with Sr90 radioactive source, and studies the charging progress of Delrin and Teflon under its radiation. This paper also presents a new model, which simulate the experiment results. It also analyzes the deep charging equilibrium potential and time with different electron intensity and dielectrics resistance. It shows that deep charging effect becomes more serious with increasing electron beam intensity and dielectrics resistance, and the time to reach charging equilibrium is mainly affected by dielectrics resistance.

Key words Deep charging, Spacecraft dielectrics, Electron gun, Radioactive source

1 引言

在空间辐射环境下, 高能带电粒子容易在航天器外围的介质材料内部或者穿过航天器屏蔽层在其内部的介质上沉积. 当这些介质材料表面与周围其他部件的电位差超过阈值, 或沉积电荷产生的场强达到击穿场强时会发生放电现象, 即深层充放电效应^[1-2]. 介质的深层充放电可以影响材料的绝缘性能, 产生的放电脉冲会干扰航天器上电子仪器的正常工作, 严重时使航天器发生故障^[3-5]. 当前聚合物绝缘材料如聚酰亚胺等被广泛应用于太阳电池板及其他航天器部件, 这些材料的深层充放电特征日益引起人们的关注^[6-7].

目前, 中国科学院空间科学与应用研究中心已建立了一套卫星深层充放电实验研究装置^[8]. 这套装置集成电子枪和 Sr90 放射源作为辐射模拟手段, 可在高真空环境下持续运行. 本文介绍了利用该装置所取得的初步实验结果, 并提出了仿真模型对实验结果进行模拟和分析, 研究结果可以为深层充放电效应的防护提供参考^[9].

2 实验设置

实验所用卫星深层充放电模拟装置主要由真空系统, 温控系统, 辐照源和测量系统组成. 真空系统包括真空罐, 机械泵和分子泵等. 真空罐为长方形 (0.5 m × 0.5 m × 1.5 m), 其中一面开口水平开合, 便于实验样品放置. 在经机械泵和分子泵近 10 h 抽真空后, 罐内真空度可以达到 1×10^{-4} Pa. 机械泵和分子泵单次运行时间不少于两个月, 保证了装置对较长时间深层充放电过程模拟的要求.

温度影响介质材料的电阻率和材料内电荷的泄放, 进而影响介质材料的表面电位和内部电场, 是深层充放电实验中的重要参数. 为了模拟介质在空间的温度变化情况, 深层充放电模拟装置采用半导体温控技术, 使得样品台的温度可在 -50°C 至 100°C 范围内调节, 调节精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

装置中的辐照源有电子枪和 Sr90 放射源. 电子枪可以提供能量 5~100 keV、束流强度 pA/cm^2 至 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 的单能电子束, 主要用于研究介质材料的电阻率等参数对深层充电过程的影响. Sr90

放射源的电子能谱分布与 GEO 轨道恶劣环境相似 (见图 1)^[1], 其电子能量与外辐射带电子能量相当 (0.1~2.2 MeV), 半衰期为 28 年, 能谱稳定, 可用于模拟 GEO 轨道环境下样品的深层充电过程.

测量系统包括表面电位计、弱电流计、罗氏线圈和电场脉冲探测仪等, 分别用以测量样品的表面电位、泄漏电流、放电电流和电场脉冲等.

实验前对样品进行干燥处理, 同时在其背部镀上电极置于温控台. 实验装置如图 2 所示. 电子枪或放射源位于样品正前方, 电子束流辐照样品正面. 样品其余部分由厚度为 5 mm 的铝板进行屏蔽. 样品电流经背电极引出穿过罗氏线圈后接弱电流计. 由于样品的表面电位主要是由内部沉积电荷量和沉积深度决定, 通过监测表面电位的变化, 可以在不破坏样品的前提下连续测量, 进而结合背电极电流等其他参量推测出样品深层充电过程.

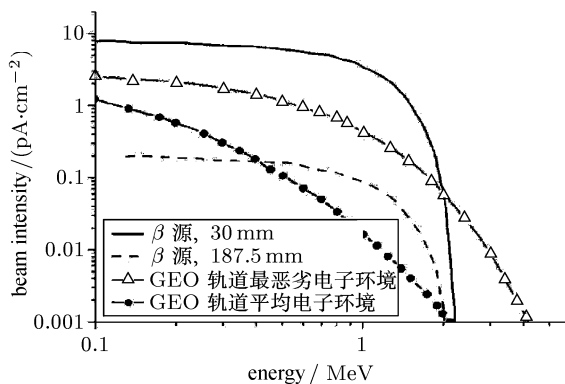


图 1 Sr90 放射源电子能谱与 GEO 轨道电子能谱的比较
Fig. 1 Comparison of electron energy spectrum between Sr90 radiation source and GEO environment



图 2 实验装置
Fig. 2 Photograph of the experiment facility

3 数值模拟方法

参考 Chudleigh^[11] 和 Berlepsch^[12] 所提出的电位衰减模型, 我们建立了适合模拟介质材料深层充电过程的模型. 该模型的主要表述如下:

$$J(x, t) = J_0(x) + \mu neE(x, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} = \frac{\rho_T}{\tau_T} - \frac{\rho_F}{\tau_F} - \frac{\partial J(x, t)}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_T(x, t)}{\partial t} = \frac{\rho_F(x, t)}{\tau_F} - \frac{\rho_T(x, t)}{\tau_T}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial x} = -\frac{\rho_F(x, t)}{\varepsilon} - \frac{\rho_T(x, t)}{\varepsilon}, \quad (4)$$

$$U(t) = \int_0^L E(x, t) dx, \quad (5)$$

$$\tau_F = (nvS_C)^{-1}, \quad (6)$$

$$\tau_T = \left[\delta \exp \left(-\frac{E_T}{\kappa T} \right) \right]^{-1}. \quad (7)$$

式中电场强度 E 、自由电荷密度 ρ_F 和束缚电荷密度 ρ_T 均为时间和空间的分布函数, ε 为介电常数, J_0 为入射电子在介质内沉积电流的空间分布函数, μ 为迁移率, e 为电子电荷数. L 为介质厚度, $U(t)$ 为介质表面电位, τ_F 为电荷平均传输时间, τ_T 为电荷平均束缚时间, n 为介质载流子浓度, v 为自由电荷迁移速度, S_C 为电荷碰撞截面积, δ 为束缚电荷跃迁频率, E_T 为能穴深度, κ 为 Boltzmann 常数, T 为温度.

模型分析计算时采用的初始条件为

$$E(x, 0) = \rho_T(x, 0) = \rho_F(x, 0) = 0.$$

计算过程为: 由模拟电子传输的相关蒙特卡罗软件结合实验条件计算出不同辐照条件下材料内 $J_0(x)$ 的沉积分布, 代入式 (1) 可以得到传输电流 $J(x, t)$ 分布; 根据式 (2) 和式 (3) 计算出 ρ_F 和 ρ_T 的分布; 由式 (4) 得出介质内部电场 $E(x, t)$ 的变化, 通过式 (5) 求出这个时刻介质的表面电位 $U(t)$; 根据时间步长再重复以上过程, 最终得到介质在深层充电过程中表面电位随时间变化曲线.

4 实验及模拟结果

4.1 电子束流强度和样品厚度对深层充电的影响

将三块厚度为 $50 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜样品分别

置于束流强度为

$$20 \text{ pA/cm}^2, 130 \text{ pA/cm}^2, 220 \text{ pA/cm}^2$$

的电子束辐照下, 电子能量保持在 20 keV , 温度保持在 20°C , 监测样品表面电位的变化过程, 得到的实验结果如图 3 中的数据点所示.

模拟计算时, 依据相关文献, μ 取值为 $5.07 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, τ_T 取 600 s , τ_F 取 90 s ^[13-14], ε 为 $3.1 \times 10^{-11} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, L 为 $50 \mu\text{m}$. 得到的模拟计算结果如图 3 中的曲线所示.

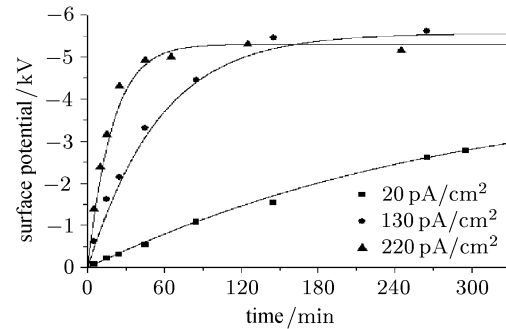


图 3 不同束流强度 20 keV 电子辐照下的充电过程

Fig. 3 Variation of surface potential versus the radiation time under different electron beam intensities

由图 3 中的实验及模拟结果可以看出, 辐照初始时刻样品的表面电位迅速上升, 这在 130 pA/cm^2 和 220 pA/cm^2 条件下尤其明显, 在 40 min 内样品的表面电位分别上升到 -3500 V 和 -5000 V 左右. 但随着时间增加, 样品的表面电位变化逐渐缓慢, 其中 20 pA/cm^2 电子辐照下样品表面电位仍在上升, 在观察的 300 min 时间内还未达到平衡, 而 130 pA/cm^2 辐照下的样品在 240 min 左右趋于平衡, 220 pA/cm^2 的电子束流辐照下的样品表面电位在 50 min 左右达到平衡.

图 3 表明, 随着电子束流强度的增加, 样品的表面电位上升速度也增加. 这意味着若发生空间环境扰动, 当中高轨道航天器运行环境中的带电粒子通量显著增高时, 航天器介质材料深层充电电位将迅速上升, 介质击穿或放电的风险将明显增大, 有必要采取相应的防护措施.

图 4 中的数据点分别为厚度 $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ 和 $175 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜样品在能量为 40 keV 电子辐照下表面电位变化的测量结果, 辐照电子束流强度保持为 20 pA/cm^2 . 模型计算条件与图 3 相同, L

分别取 $50\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ 和 $175\ \mu\text{m}$, 得到的结果如图 4 曲线所示。

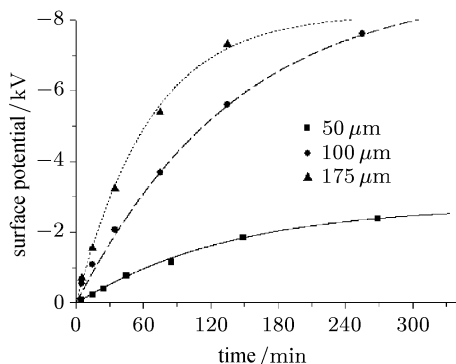


图 4 40 keV 电子辐照不同厚度样品的充电过程

Fig. 4 Variation of surface potential versus time of samples with different thickness

图 4 表明, 随着材料厚度增加, 相同时间内的样品表面电位也增加, 且趋向的平衡电位不再相同, 材料厚度越大时, 表面电位越高。因此航天器上介质厚度必须慎重选择, 厚度大的介质虽然有更好的绝缘性能, 但由于在辐射环境下其表面电位更高, 具有更大的放电风险。

4.2 Sr90 放射源模拟 GEO 轨道环境介质

深层充电

采用厚度为 2 mm 的聚甲醛树脂 (Delrin) 和聚四氟乙烯 (Teflon) 电路板作为实验样品, 利用 Sr90 放射源的连续能谱电子进行辐照, 电子束流强度约为 $2\ \text{pA}/\text{cm}^2$, 模拟航天器介质在 GEO 轨道遭遇的深层充电。模型计算时, ε 分别采用 $1.86 \times 10^{-11}\ \text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $4.43 \times 10^{-11}\ \text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[15], L 为 2 mm。实验及模拟结果分别如图 5 中的数据点和曲线所示。

在经历近 15 h 辐照后, 聚甲醛树脂表面电位约为 $-1500\ \text{V}$, 而聚四氟乙烯的表面电位达到了 $-4500\ \text{V}$ 。这是由于聚四氟乙烯电阻率比聚甲醛树脂的电阻率高约 3 个量级, 更大的电阻率导致更多电荷累积在材料内部, 进而使得样品表面电位更高。数值模拟的连续能谱电子辐照结果同样与实验吻合得较好。

4.3 深层放电电流与电场脉冲的观测

将 2 mm 厚的环氧树脂电路板置于 $160\ \text{pA}/\text{cm}^2$ 的 40 keV 电子束流辐照下, 经过近 10 min 的辐照后, 介质就产生了放电脉冲, 如图 6 和图 7 所示。这表

明, 当辐照电子束流较强时, 介质深层充电现象较剧烈, 能够较快地导致放电现象的发生。

图 6 为罗氏线圈测量到的样品放电电流脉冲。由信号幅度可以推断出放电电流约为 6 A。与图 6 相对

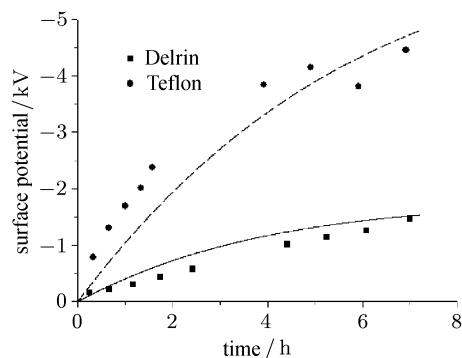


图 5 放射源辐照实验及数值模拟结果

Fig. 5 Result of radiation source experiment and simulation

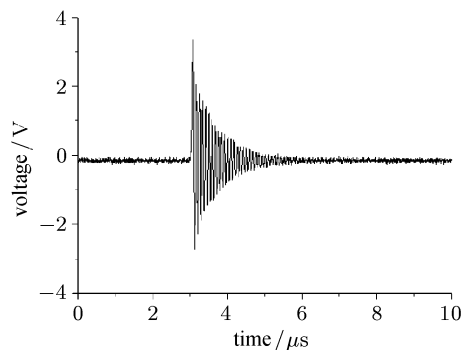


图 6 深层放电电流脉冲

Fig. 6 Current pulse of deep dielectric discharging

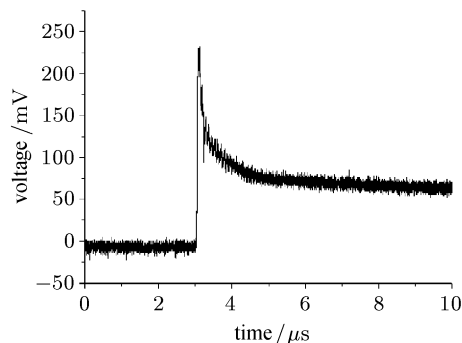


图 7 距离介质 30 cm 处的放电电场脉冲

Fig. 7 Electric field pulse captured in the distance of 30 cm from the discharging dielectrics

应的距离样品 30 cm 处测量到的电场脉冲如图 7 所示, 可推断出放电电场强度约为 27 V/m. 样品放电后其表面电位由 -11130 V 瞬间降为 -2240 V.

介质内部电荷放电不仅破坏材料的绝缘性能, 而且强的放电电流和电磁脉冲可能导致器件和电路损坏和信号干扰, 对航天器安全具有极大危害.

5 深层充电平衡电位与平衡时间数值模拟

图 3~5 所示的数值模拟结果均与实验结果吻合得较好, 表明该模型适用于描述深层充电现象. 进一步, 利用该模型模拟研究不同条件下的介质深层充电过程相关参量的变化, 可以深入揭示深层充电的机制, 并为相关防护设计提供参考.

当介质受到电子持续辐照时, 若未发生放电, 介质内部电场分布最终将达到一个平衡状态, 此时介质表面电位达到平衡电位 ($U_{\max}$). 通过模型计算不同电子束流强度和不同介质电阻率条件下 $U_{\max}$ 的变化过程, 得到如图 8 所示的结果. 从图 8 可以看出, 随着介质电阻率的变化, $U_{\max}$ 随电子束流强度的变化处于不同的直线上. 介质电阻率越高, 则辐照电子强度越高, 介质平衡电位越高, 深层充电现象越明显.

在介质材料厚度不变时, 介质平衡电位 $U_{\max}$ 的增加表明, 介质内部电场最终可以达到的强度在不断增强, 当内部电场达到或超过介质击穿阈值时将会引起放电现象. 因此为了防护深层充放电效应, 要避免航天器中的高电阻率介质材料遭受高强度电子的持续辐照.

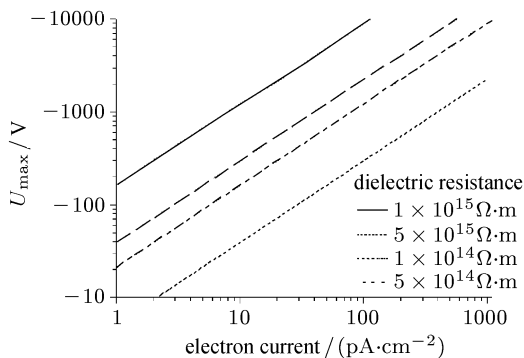


图 8 不同束流强度电子辐照下的平衡电位

Fig. 8 Equilibrium potential in deep dielectric charging versus electron beam intensities

图 9 为介质材料达到深层充电平衡所需时间 τ 随介质电阻率的变化曲线. 从图 9 可以看到, 在介质电阻率小于 $10^{14} \Omega \cdot m$ 时, 平衡时间并不随着入射电子束流强度发生明显变化. 由于大部分介质的电阻率均小于 $10^{14} \Omega \cdot m$, 因此图 9 说明决定介质深层充电平衡时间主要是其电阻率.

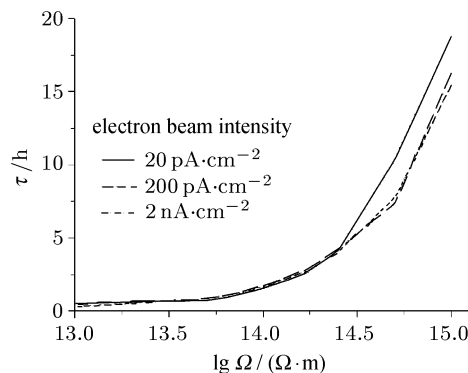


图 9 深层充电平衡时间随介质电阻率的变化

Fig. 9 Equilibrium time in deep dielectric charging versus dielectric resistance

当聚合物介质电阻率过高时, 介质深层充电平衡时间较长. 在相同束流强度电子辐照下, 高电阻率介质内部将累积更多的电荷, 介质的表面电位与内部电场更高, 具有更大的放电风险. 因此航天器内聚合物介质必须在满足绝缘要求时选用低电阻率材料, 以减少深层充放电效应的影响.

6 结论

通过实验测量结合模型计算初步揭示了深层充电效应的规律, 表明介质深层充电效应随着入射电子束流强度和介质电阻率的增加而趋于明显, 介质电阻率是影响介质深层充电平衡电位和平衡时间, 即充电程度的主要因素. 这些实验和模拟计算结果可为深层充放电防护提供参考.

参考文献

- [1] Lanzerotti L J, Breglia C, et al. Studies of spacecraft charging on a geosynchronous telecommunications satellite [J]. *Adv. Space Res.*, 1998, **22**(1):79-82
- [2] Huang Jianguo, Chen Dong. A study of deep dielectric charging on satellites for different grounding patterns [J].

- Acta Phys. Sinica*, 2004, **53**(5): 1611-1616. in Chinese (黄建国, 陈东. 不同接地方式的卫星介质深层充电研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(5):1611-1616)
- [3] Violet M D, Frederickson A R. Spacecraft anomalies on the CRRES satellite correlated with the environment and insulator samples [J]. *IEEE Trans. Nucl. sci.*, 1993, **40**(6):1512-1520
- [4] 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
- [5] Gussenhoven M S, Mullen E G. Space radiation effects program: An overview [J]. *IEEE Trans. Nucl. sci.*, 1993, **40**(2):221-227
- [6] Chen Shuhai. Nonmetal material in satellites structure [J]. *Aeros. Shanghai*, 2004, **3**:39-43. in Chinese (陈树海. 卫星结构中的非金属材料[J]. 上海航天, 2004, **3**:39-43)
- [7] Shu T L. A critical overview on spacecraft charging mitigation methods [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2003, **31**(6):1118-1124
- [8] Han Jianwei, Zhang Zhenlong, Quan Ronghui, *et al.* An environmental simulation facility for study of deep dielectric charging on satellites [J]. *Spacec. Env. Eng.*, 2007, **24**(1):47-50. in Chinese (韩建伟, 张振龙, 全荣辉, 等. 卫星介质深层充放电模拟实验装置研制进展[J]. 航天器环境工程, 2007, **24**(1):47-50)
- [9] Zhang Zhenlong, Quan Ronghui, Yan Xiaojuan, *et al.* A study on deep dielectric charging on polyimide film under electron beam irradiation [J]. *Spacec. Env. Eng.*, 2008, **25**(1):22-25. in Chinese (张振龙, 全荣辉, 闫小娟, 等. 电子辐照下聚酰亚胺薄膜的深层充电现象研究[J]. 航天器环境工程, 2008, **25**(1):22-25)
- [10] Ryden K A, Morris P A, Rodgers D J, *et al.* Improved demonstration of internal charging hazards using the Realistic Electron Environment Facility [C]. Proceeding of the 8th SCTC. Huntsville, 2003
- [11] Chudleigh P W. Charge transport through a polymer foil [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**:4591-4593
- [12] Berlepsch H. Interpretation of surface potential kinetics in HDPE by a trapping model [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1985, **18**:1155-1157
- [13] Murakami Y, Hayshi N, Putra E, *et al.* Estimation of charge mobility and charge density in polyimide film by charge chromatography [J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(4A):1553-1556
- [14] John S resen, *et al.* ESA's tools for internal charging [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2000, **47**(3):491-497
- [15] National Aeronautics and Space Administration. Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-orbit Internal Charging Effects [R]. NASA-HDBK-4002, 1999