多层电路板的深层充电研究

王建昭, 陈鸿飞*, 于向前, 邹鸿, 施伟红

北京大学空间物理与应用技术研究所, 北京 100871

* E-mail: hfchen@pku.edu.cn

收稿日期: 2014-03-27; 接受日期: 2014-07-05; 网络出版日期: 2015-02-02

国家自然科学基金(批准号: 41374181)和国家重大科学仪器专项(批准号: 2012YQ03014207)资助项目

摘要 以欧空局的 FLUMIC2 模型为输入电子能谱, 基于 Monte Carlo 方法和辐射诱导电导率模型进行多层电路板充电分析, 可模拟地球同步轨道上有 2 mm 铝层屏蔽时的多层 FR4 印刷电路板的深层充电过程, 得到电场和电势随介质深度的变化. 研究发现与双面接地电路板相比较, 电路板四层铺铜接地内部最大充电电场减少 54%, 有效地减小介质内部电场, 降低深层放电风险. 充电时间常数和电介质的物理特性有关而与电路板分层情况无关. 分析各接地层的电流, 两层电路板为 $90\sim 150\text{ pA m}^{-2}$, 四层电路板为 $10\sim 100\text{ pA m}^{-2}$.

关键词

深层充电

辐射诱导电导率

Geant4

Monte Carlo 方法

地球同步轨道

1 引言

空间高能粒子辐射对航天器安全有重要影响, 包括总剂量效应、单粒子效应和充放电效应. 其中充放电效应尤其是深层充电是造成航天器故障的重要原因之一, 成为人们关注的热点. 深层充电是指空间高能粒子(主要是 $0.1\sim 10\text{ MeV}$ 的电子)穿透卫星表面, 沉积在介质材料内并建立电场的过程. 电场的形成是动态过程, 一方面, 电子与介质相互作用, 发生韧致辐射、电离和多重散射等物理过程并沉积. 另一方面, 由于介质的电导率影响, 在电场作用下沉积电子会形成泄放电流. 如果介质中电子沉积速率超过泄放速率, 介质电场将随时间逐渐增加, 直到电子沉积和泄放达到平衡, 电场达到最大值. 如果产生的电场超过材料放电阈值将发生放电现象. 由于有大量卫星运行于地球静止同步轨道(GEO 轨道), 并且 GEO 轨道高能电子辐射较为严重, 研究该轨道高度的深层充电效应具有重要应用价值.

人们在实验和理论分析基础上, 建立了一些深层充放电的分析工具, 其中较为流行的是欧空局(ESA)的 DICTAT^[1]和美国航空航天局(NASA)的 NUMIT^[2]. 数值模拟作为一种低成本、高效的方法可以预测材料的充放电行为, 为研究充放电过程、建立分析工具提供重要定量依据. 国内研究机构也进行了大量研究, 秦晓刚等人^[3]基于 Monte Carlo 方法的模拟说明在单能电子辐照下, Teflon 介质背面接地时最大电场达到 10^7 V m^{-1} , 远高于正面接地的最大电场(10^6 V m^{-1}). 黄建国和陈东^[4]的计算结果表明双层接地时充电电场和电势比单层接地时进一步减小, 可以降低放电危险. Tang 等人^[5]用有限元方法研究了一种典型电路板的三维深层充电过程, 指出电路板边缘有更大的放电危险.

这些研究表明, 不同电路板的使用条件会对深层充放电效应产生很大影响. 卫星上常用的电路板多以 FR4 作为基材, 即环氧树脂玻璃布层压板. 随着电路密度的增加, 常采用多层覆铜箔电路板. 可以想

引用格式: 王建昭, 陈鸿飞, 于向前, 等. 多层电路板的深层充电研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 330–337

Wang J Z, Chen H F, Yu X Q, et al. Study on internally dielectric charging of multilayer circuit board (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 330–337, doi: 10.1360/N092014-00046

象, 多层接地电路板与之前分析的单层或双层接地电路板相比较, 除考虑覆铜箔对粒子在电路板中输运影响以外, 内接地层的存在也势必对电路板充电产生影响. 本文将对两层电路板和四层电路板分别建模, 采用常用 FR4 介质参数, 以 GEO 轨道作为目标, 对这一影响进行分析.

2 模拟方法

模拟计算方法和流程如图 1 所示. 首先分别对两层和四层的 FR4 电路板建模, 选择典型 GEO 轨道电子辐射模型作为模拟输入, 然后用 Monte Carlo 软件包 Geant4 模拟空间高能电子在电路板中的输运过程, 再用辐射诱导电导率模型 (RIC 模型) 模拟电路板中电场和电势等物理量随时间的变化^[6], 得到介质内部的深层充电图像.

2.1 多层电路板建模

模拟计算的目标模型由电路板和屏蔽层两部分结构组成. 图 2(b)所示为四层电路板模型, 各布线层为接地平板, 即假定布线率很高或有接地覆铜的情况. 如果去除四层电路板的内覆铜层, 即得到如图 2(a)所示的两层电路板模型. 假定电路板放在卫星内部的机箱里面, 高能电子受卫星蒙皮和机箱屏蔽后才能到达电路板. 卫星蒙皮厚度选择 1 mm 等效铝^[7], 机箱蒙皮也选择 1 mm 等效铝板的极端情况. 在模拟计算模型中, 用在电路板前面设置 2 mm 的铝屏蔽层来等效卫星蒙皮和机箱蒙皮的作用.

图 2 用于仿真分析的印刷电路板模型
(a) 两层接地模型; (b) 四层接地模型

图 2 中 x 坐标表示电路板由表面至内部的深度方向. 图中深色层代表覆铜层, 模拟计算时作接地处理. 空心框代表 FR4 主体的环氧树脂玻璃纤维层(简称环氧树脂层). 环氧树脂成分组成会因生产批次不同或者制作工艺不同而不同, 本文选取一种典型的环氧树脂元素组成^[8], 如表 1 所示. 电路板各层厚度参考文献^[9]. 对于四层电路板, 从表面沿 x 方向各层厚度分别为 35 μm 覆铜层, 287.02 μm 环氧树脂层, 17 μm 覆铜层, 800 μm 环氧树脂层, 17 μm 覆铜层, 287.02 μm 环氧树脂层和 35 μm 覆铜层. 对于两层电路板, 各层厚度分别为 35 μm 覆铜层, 1408.04 μm 环氧树脂层和 35 μm 覆铜层.

实际常用 FR4 电路板的各导电层是用来做电路布线设计的. 一般布线对地会有一定电阻. 多数情况下, 电路布线的两端分别连接上一级电路的输出和下一级电路的输入. 输出电路的阻抗一般小于 100 Ω . 概括说, 真实电路布线对地电阻小于 100 $\text{k}\Omega$. 空间高能电子的充电电流一般为 pA 到 100 pA 量级^[10], 在 100 $\text{k}\Omega$ 电阻上的压降小于 1 μV . 与绝缘介质的电阻相比较, 布线对地电阻可以忽略不计. 在模拟计算时, 假定电路布线层接地是合理的.

与介质材料相比较, 覆铜箔电导率非常大, 作为等电势体. 模拟仿真的目标是计算电路板介质(环氧树脂层)中的充电电场. 各层铜箔将作为零电势边界来处理.

图 1 介质深层充电模拟方法

表 1 环氧树脂的元素组成

元素	氢	氧	碳	硅
质量比(%)	36.3	43.1	14.8	5.8

2.2 空间电子辐射模型

模拟仿真计算需要尽可能接近真实的高能电子环境输入条件. 工程上常用的空间电子辐射环境模型为 NASA 的 AE8 模型. 但由于介质深层充电多发生在空间环境比较恶劣的时候, 因此采用描述辐射带平均电子辐射的 AE8 模型是不合适的. 我们采用 ESA 的 FLUMIC2 电子通量模型^[1]作为电路板充电模拟计算的输入参数. FLUMIC2 模型描述较恶劣空间环境下外辐射带电子辐射环境, 如公式(1)所示.

$$F(E, L, f_{sc}, f_{yr}) = a(L)F_R(f_{sc}, f_{yr}) \exp\left(\frac{2-E}{b(L)E_0(f_{sc})}\right), \quad (1)$$

其中, F 为以能量 E 为下限的电子积分通量, 是 E, L, f_{sc}, f_{yr} 的函数, 单位($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$); L 为粒子漂移壳参数; f_{sc} 和 f_{yr} 分别表示太阳周期和年周期变量, 取值范围都是 $[0, 1]$, F_R 为 GEO 轨道能量大于 2 MeV 电子的积分通量; $a(L)$ 与 $b(L)$ 分别是与 L 值有关的系数; $E_0(f_{sc})$ 是与太阳周期有关的能量常数.

为研究 GEO 轨道深层充电, 取 $L=6.6$, 此时 $a=2.17$, $b=1.03$. 在 FLUMIC2 模型中, $E_0=0.5$ MeV 时高能电子相对最多, 再取参考值 $F_R=6.9 \times 10^8 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$. 把这些参数带入公式(1)可获得 GEO 轨道恶劣条件下的高能电子积分通量谱. 用公式(1)的积分通量谱对能量微分可得到微分通量谱, 单位为($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{MeV}^{-1}$). 图 3 所示为由此方法计算的 GEO 轨道恶劣条件下的 0.1~10 MeV 电子微分通量谱.

2.3 电场计算模型

Geant4 软件为粒子辐射 Monte Carlo 模拟计算工具, 可以仿真计算粒子输运过程及在介质中的沉积

图 3 GEO 轨道电子微分通量谱

情况. 但要获得深层充电电场结果还需要建立电场计算模型. 为了简化计算, 只考虑一维情况, 即电场仅随电路板深度 x 变化. 本文选用 RIC 模型^[11], 对于一维情况, 电场可以由下列公式求解:

$$\varepsilon \frac{\partial E(x, t)}{\partial x} = \rho_-(x, t) + \rho_{t-}(x, t), \quad (2)$$

$$\mu_- \rho_-(x, t) E(x, t) + \sigma(x) E(x, t) + J(x) + \varepsilon \frac{\partial E(x, t)}{\partial t} = J_0(x, t), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_{t-}(x, t)}{\partial t} = \frac{\rho_-(x, t)}{\tau_-} \left(1 - \frac{\rho_{t-}(x, t)}{\rho_m} \right), \quad (4)$$

$$V(x, t) = - \int_0^x E(x, t) dx. \quad (5)$$

其中, x 和 t 为自变量, 分别表示深度变化和时间变化; $E, \rho_-, \rho_{t-}, J_0, V$ 分别表示电场强度、自由电荷密度、束缚电荷密度、总电流、电势; $\sigma(x), J(x)$ 分别是对应 x 深度的总电导率和电子束电流; ε 为介电常数; μ_- 是自由电荷迁移率; τ_- 为自由电荷俘获时间常数; ρ_m 是最大俘获电荷密度.

公式(2)~(5)分别是泊松方程、电流连续性方程、电荷俘获方程、电势定义方程. 泊松方程表示电场强度和电荷的关系; 电流连续性方程表示总电流由迁移电流、传导电流、电子束电流和极化电流组成; 电荷俘获方程表示自由电荷向束缚电荷转化的过程.

根据能带理论, 高分子聚合物在受辐照情况下总电导率 σ 将有明显增加^[12], 即:

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_r = \sigma_d + k \dot{D}^d. \quad (6)$$

其中, σ_d 是材料暗电导率, 即未受辐照时的电导率; σ_r 为辐射诱导电导率(RIC); $\dot{D}$ 是辐射剂量率, 单位为 rad s^{-1} ; k 和 d 分别为辐射诱导电导率的系数和指数, 因材料选择而不同并可通过实验测得.

除了辐射导致的电介质电导率增加, 在较高电场下电导率也会增加^[13]. 一般而言, 电路板中的电场大小 E 不会高于 10^8V m^{-1} , 根据文献[13], 这种情况下电场引起的电导率增加可表示为

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{2 + \cosh(\beta_F E^{1/2} / 2k_B T)}{3}, \quad (7)$$

其中, σ_0 是没有电场时的电导率; k_B 是 Boltzmann 常数; T 是温度, 模拟中取室温 20℃; $\beta_F = (e^3 / \pi \varepsilon)^{1/2}$; $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, 是电子电量.

作为一维解, 可将电路板分为若干层, 用 Geant4

模拟获得电子在某层中的沉积总能量 E_d (单位, MeV) 和穿过该层的总电子数 Q . 由前者得到该层的辐射剂量率 $\dot{D}$ (单位, rad s^{-1}); 由后者得到穿过该层的电子束电流 $J(x)$ (单位, A m^{-2}).

$$\dot{D} = 1.6 \times 10^{-11} \cdot \frac{E_d}{T_s \rho A_m \Delta x}, \tag{8}$$

$$J = -\frac{Qe}{T_s A_m}, \tag{9}$$

其中, ρ 为介质密度 (单位, kg m^{-3}); A_m 为电路板面积 (单位, m^2); Δx 是分层厚度 (单位, m); T_s 是仿真时间 (单位, s), 即一步 Monte Carlo 模拟的电子数相对于真实空间辐射同样个数电子所需的时间.

在实际的 Geant4 模拟中, 已经考虑了电子的背散射对 $J(x)$ 的贡献. 其次, 实际模拟中次级电子对 $J(x)$ 的贡献很小, 主要是因为: 实际模拟中把电路板分为 164 层, 单层厚度大于 $10 \mu\text{m}$, 次级电子只有能量足够大, 射程超过 $10 \mu\text{m}$ 时才对电流有贡献, 而这样的电子很少, 次级电子的产生和流动方向具有随机性, 总体而言对电流贡献小. 另外, 次级电子的产生会导致电导率的增加, 而这已经考虑在 RIC 中.

把公式(7)和(8)带入(6)可以得到 $\sigma(x)$, 在给定初始条件和边界条件情况下, 再按时间差分求解公式(2)~(5)的微分方程组. 选取初始条件是 $E(x,0)=0$, $\rho_-(x,0)=0$, $\rho_+(x,0)=0$. 边界条件根据电路板覆铜层的状态来处理. 覆铜层接地, 电势为 0.

介质层为环氧树脂, 其暗电导率可由电荷衰减法测得. 各物理参数取值如表 2 所示^[3,14].

2.4 Geant4 模拟及电场计算

如果用 N 表示一次模拟计算时输入的总电子数量, T_s 为仿真时间, 则

$$T_s = \frac{N}{n} = \frac{N}{F\phi}, \tag{10}$$

其中, n 为单位时间的模拟电子数; F 为空间辐射通量; ϕ 为归一化因子, 与模拟时使用的电子源形状和尺寸有关.

表 2 环氧树脂物理特性

$\rho (\text{kg m}^{-3})$	$\mu (\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$	$\rho_m (\text{C m}^{-3})$	$\sigma_d (\Omega^{-1} \text{m}^{-1})$
1.78×10^3	5×10^{-15}	4×10^3	5×10^{-16}
$\varepsilon (\text{F m}^{-1})$	$k (\text{s } \Omega^{-1} \text{m}^{-1} \text{rad}^{-1})$	$\tau (\text{s})$	A
4.2×10^{-11}	3×10^{-16}	1	1

因为只考虑一维情况, 不考虑电路板边缘和中心所受辐射的差异, 选用平面入射电子源, 如图 4 所示. 归一化因子 $\phi=A_i$, 其中 A_i 是入射源的面积.

根据公式(10), 选择一个总电子数 N 相当于进行了仿真时间 T_s (这里记为 t_1) 的充电模拟计算, 然后使用 RIC 模型求解电场分布. 再选择总电子数 N , 进行第二个仿真时间 t_2 的计算, 再计算电场分布, 重复进行至电场稳定为止. 假定空间辐射通量 F 恒定不变, 则 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 为等间隔的离散时间系列, 计算结果为公式(2)~(5)的差分解.

根据第 1.2 节的模型计算获得模拟输入的空间电子能谱(F). 每次模拟使用 $N=10^6$ 个电子, 相当于较恶劣空间环境下 $T_s=4.5 \times 10^{-3} \text{ s}$ 的辐射量. T_s 即是模拟计算的时间步长 Δt .

图 4 模拟中用到的粒子源

图 5 导电层接地情况下的边界条件 (a) 两层接地; (b) 四层接地

在用 RIC 模型求解电场时, 需要把电势为 0 的边界条件换算为电场和电流的边界条件. 各边界量的定义如图 5 所示. 图 5(a)为双面接地情况, x_1 是第一覆铜层下表面; x_4 是第二覆铜层上表面. 在 2 个覆铜层位置上电势分别为 0. 根据公式(5), 若用电场来表达

则为 $\int_{x_1}^{x_4} E dx = 0$. 另外, 根据电流守恒条件, 介质内总电流守恒, 则 $J_0(t) = J(x_1) + j_1(t) = J(x_4) - j_4(t)$, 其中 $j_1(t)$ 和 $j_4(t)$ 分别为经第一覆铜层和第二覆铜层流入介质的电流(流入为正, 流出为负); $J(x_1)$ 和 $J(x_4)$ 分别为相应位置处的入射电子束电流. 采用一维分层的离散模型来求解公式(3), 结果为分层求和形式, 得到总电流的变化如公式(11)所示.

$$J_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^m \frac{J(i) + \varepsilon \frac{E(i, t_{j+1}) - E(i, t_j)}{\Delta t}}{\sigma(i) + \mu_- \rho_-(i, t_j)} \cdot \Delta x}{\sum_{i=0}^m \frac{1}{\sigma(i) + \mu_- \rho_-(i, t_j)} \cdot \Delta x}, \quad (11)$$

其中, i 为层编号, 等于 $0, 1, 2, \dots, m$; 假定分层均匀, 各模拟分层的位置为 $x = i \cdot \Delta x + x_1$; Δx 为分层的宽度; $t_j, j=0, 1, 2, \dots, n$, 为仿真时间; Δt 是时间差间隔. 把边界条件和初始条件带入 RIC 模型, 可求得不同时刻电场等物理量的分布.

若为四层电路板, 如图 5(b)所示, x_1 是第一覆铜层下表面; x_{21} 是第二覆铜层上表面; x_{22} 是第二覆铜层下表面; x_{31} 是第三覆铜层上表面; x_{32} 是第三覆铜层下表面; x_4 是第四覆铜层上表面. 边界条件为在 4 个覆铜层位置上电势为 0. 四层电路板可分解为 3 个独立的介质层, 分别是 x 在 (x_1, x_{21}) , (x_{22}, x_{31}) , (x_{32}, x_4) 三个区间. 边界条件可转化为

$$\int_{x_1}^{x_{21}} E dx = 0, \int_{x_{22}}^{x_{31}} E dx = 0, \int_{x_{32}}^{x_4} E dx = 0. \quad (12)$$

介质层中的总电流可以表达为

$$J_{01}(t) = J(x_1) + j_1(t) = J(x_{21}) - j_{21}(t), \quad (13)$$

$$J_{02}(t) = J(x_{22}) + j_{22}(t) = J(x_{31}) - j_{31}(t), \quad (14)$$

$$J_{03}(t) = J(x_{32}) + j_{32}(t) = J(x_4) - j_4(t), \quad (15)$$

其中, $J_{01}(t)$, $J_{02}(t)$ 和 $J_{03}(t)$ 分别表示 3 个介质层中的总电流; $J_1(t)$ 为经第一覆铜层流入的电流; $J_{21}(t)$ 和 $J_{22}(t)$ 分别为第二覆铜层流入介质层 (x_1, x_{21}) 和 (x_{22}, x_{31}) 的电流; $J_{31}(t)$ 和 $J_{32}(t)$ 分别为第三覆铜层流入介质层 (x_{22}, x_{31})

和 (x_{32}, x_4) 的电流; $j_4(t)$ 为经第四覆铜层流入的电流. 这些电流流入为正, 流出为负. 和两层电路板模型一样, 可采用一维分层的离散模型求解 3 个介质层的总电流, 在此不再赘述.

3 结果及讨论

本文使用适用于 GEO 轨道的 FLUMIC2 模型计算空间电子辐射强度, 作为输入分别对两层和四层电路板进行深层充电分析. 图 6 所示为最大电场随辐照时间的变化, 反映了电路板的充电特性. 充电过程是一个快速上升, 逐步达到饱和的过程. 本文计算了 100 h 仿真时间的充电过程, 电场已达到饱和.

如图 6 所示, 充电过程大致是一个指数上升的过程. 可近似为: $E = E_s[1 - \exp(-t/\tau)]$, 其中, E_s 为饱和电场; τ 为充电时间常数. 根据模拟计算, 对于两层电路板模型和四层电路板模型, 充电时间常数分别是 22.1 和 22.2 h. 如果以饱和电场值的 90% 作为达到充电平衡的定义, 则达到充电平衡的时间是 49.8 和 49.9 h.

NASA 4002A 《缓解在轨深层充电效应技术手册》对充电时间常数有一个简单的估算公式^[15] ($\tau = \varepsilon/\sigma$). 代入环氧树脂的介电常数和电导率参数, 估算充电时间常数为 23 h. 与本文计算的 τ 结果大致相同.

Wrenn 等人^[16]用 2 d 的电子通量水平作为衡量是否发生深层放电的指标, 指出在最恶劣环境下也需要 30 h 才能发生放电. 张振龙等人^[17]用 ^{90}Sr - ^{90}Y 源进行的地面深层充电实验结果表明, 环氧树脂样品经过 48 h 的辐照, 表面电位和电场趋于平衡. 当高辐射持续时间超过充电时间常数, 小于充电平衡时间的情况下, 将有可能发生放电现象. 由于介质材料的电

图 6 最大电场随辐照时间的变化

性参数存在很大的不确定性,即使不同批次的 FR4 材料也存在较大差异,实际的深层充电时间存在不确定性.

对比两层和多层电路板模型发现,虽然内部接地层改变了充电电场值,但充电时间常数基本一致.也就是说,在同样辐射环境下,放电所需要的累计时间不因电路板的分层多少而不同,而只与电路板介质材料特性有关.

图 7 显示模拟经过 100 h 的辐照后电路板的饱和电场和电势分布.因为导电层(覆铜层)的电导率很高,导电层内电场为 0.边界条件要求电路板的导电层电势为 0.对于四层电路板模型,内部导电层处电场不连续.电场绝对值最大的位置在导电层附近,与介质层厚度呈正相关.

表 3 给出两种电路板的最大电场和最大电势统计结果.可以看出,四层电路板要比两层电路板的最大电场减小 54%,最大电势减小 72%.说明具有内部铺铜接地设计的多层电路板可以大大减小深层充、放电风险.

FR4 材料的放电阈值是 10^7 V m^{-1} .模拟中两层电路板最大充电电场为 $2.6 \times 10^5 \text{ V m}^{-1}$,不能发生放

表 3 充电饱和后的最大电场、电势(绝对值)

	最大电场(V m^{-1})	最大电势(V)
两层接地	2.6×10^5	77.8
四层接地	1.2×10^5	22.1

电.另外,根据文献[14],对于两层接地的 FR4 电路板,CRRES 卫星的在轨内部放电实验(IDM)指出,前 245 d 不发生放电现象.这和本文的模拟结果是一致的.而在轨 245 d 后,电路板开始发生放电,这可能是由于长时间在轨而受空间高能粒子辐射导致 FR4 材料性质发生改变,譬如电导率或者放电阈值发生变化.另一方面,文献[14]用 NUMIT 软件对两层接地 FR4 电路板(厚度为 3.12 mm)的充电电场进行了模拟.表明在流量为 $4 \times 10^{-9} \text{ A m}^{-2}$ 的 1 MeV 电子辐照下,50 h 后介质最大电场达到 $3.7 \times 10^6 \text{ V m}^{-1}$.这一结果和本文的模拟结果相似,也不能达到放电阈值.存在差异的可能原因是:本文模拟的空间环境的电子流量小于文献中给出的;本文模拟的电路板厚度也小于文献中的.这两种情况都会使文献中的电路板更容易沉积电子,而得到较大的充电电场.

模拟计算还给出了导电层接地电流随辐射时间的变化情况.初步计算结果中导电层接地电流呈现有规律的波动现象,应该与模拟计算过程有关.在计算过程中,用 Geant4 计算进入的电子数(转化为入射电流),再用 RIC 模型计算辐射电导率、电场和沉积电荷的泄放(边界上的注入电流).由于这两个过程是交替进行的,虽然总和能够自愈,但边界注入电流结果会发生虚假的振荡.为排除虚假波动现象,本文对电流进行平滑,得到平稳的导电层电流变化情况,如图 8 所示.

表 4 所示为各导电层饱和电流.对于两层电路板,前面的导电层电流的绝对值大于背面的.对于四层电路板,第二导电层电流绝对值最大,第四导电层最小.各层电流大小与电子辐射能谱函数有关,也与电路板各介质层厚度有关.如第 2.1 节所述,本文引用的四层电路板模型,中间的介质层厚度(800 μm)要大于两边的介质层(287 μm).中间的介质层积累更多的电荷,并从最近的内部导电层(第二、三层)泄放,所以第二、三导电层电流较大.另一方面,低能量电子通量大但穿透深度浅,导致前面的第二层电流比第三层大.

一些文献中并没有考虑电场对电导率的影响,如 NASA 的《缓解在轨深层充电效应技术手册》.本研究组也做了这种情况下的模拟.结果表明,如果不

图 7 饱和电场(a)和电势(b)随电路板深度分布

图8 电路板导电层接地电流随辐照时间变化
(a) 两层接地; (b) 四层接地

表4 各导电层饱和电流

两层 接地	层号	1	2		
	电流 (pA m ⁻²)	1.3×10 ²	9.5×10		
四层 接地	层号	1	2	3	4
	电流 (pA m ⁻²)	3.4×10	9.3×10	6.3×10	1.1×10

考虑电场对电导率的影响, 最大电场会高估约 1%。这主要是因为只有在很高的电场下(10^7 V m^{-1} 以上), 电场导致的电导率增加才能达到可观的程度(几倍以上), 而此时已接近放电阈值了。

4 总结

本文针对两层和四层典型电路板模型, 选择 GEO 轨道空间恶劣环境下高能电子辐射作为输入条件, 用 Geant4 计算电子在电路板中的输运和沉积量, 再用 RIC 模型模拟计算电路板中的充电过程。研究表明: 充电时间常数为 22.2 h。经过持续 49.9 h 的辐照后, 内部电场达到饱和值, 这一结果和 Wrenn 等人^[16]的结果大致相当。模拟计算还表明: 充电时间常数与饱和时间不因电路板分层情况而不同, 只取决于电路板介质特性。内部饱和电场位形因电路板分层情况而不同, 在覆铜层处电场不连续。饱和时四层电路板最大电场为 $1.2 \times 10^5 \text{ V m}^{-1}$, 是两层电路板最大电场 $2.6 \times 10^5 \text{ V m}^{-1}$ 的 46%, 说明电路板内电层接地层将大大减小电路板内部充电电场, 降低放电危险, 这一结论可为航天器的内带电防护提供参考。充电过程中各接地层流经的电流大小基本不随时间变化。对于双层电路板, 接地层电流密度在 $90 \sim 150 \text{ pA m}^{-2}$, 而四层电路板接地层电流密度在 $10 \sim 100 \text{ pA m}^{-2}$, 这一结果为内带电测量仪器的研制提供了参考。

参考文献

- 1 Sorensen J. Engineering Tools for Internal Charging. DERA/CIS/CIS2/CR000277. 2000
- 2 Jun I, Garrett H B, Kim W, et al. Review of an internal charging code, NUMIT. IEEE T Plasma Sci, 2008, 36: 2467–2472
- 3 秦晓刚, 贺德衍, 王骥. 基于 Geant4 的介质深层充电电场计算. 物理学报, 2009, 58: 684–689
- 4 黄建国, 陈东. 不同接地方式的卫星介质深层充电研究. 物理学报, 2004, 53: 1611–1616
- 5 Tang X J, Yi Z, Meng L F, et al. 3-D internal charging simulation on typical printed circuit board. IEEE T Plasma Sci, 2013, 41: 3448–3452
- 6 王骥, 邱家稳, 秦晓刚, 等. 航天器介质深层充电模拟研究. 空间科学学报, 2008, 28: 242–247
- 7 Li X C, Chen H F, Hao Y Q, et al. Investigation of electrons inside the satellite by the Geant4 simulation. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 2271–2275
- 8 秦晓刚. 介质深层带电数值模拟与应用研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2010. 42–43
- 9 余乾顺. 微弱电流检测系统的设计与实现. 硕士学位论文. 兰州: 西北师范大学, 2009. 22–25
- 10 Ryden K A, Morris P A, Ford K A, et al. Observations of internal charging currents in medium earth orbit. IEEE T Plasma Sci, 2008, 36: 2473–2481
- 11 Sessler G M. Charge dynamic in irradiated polymers. IEEE T Dielect El In, 1992, 27: 961–973
- 12 焦维新, 濮祖荫. 飞船内部带电的物理机制. 中国科学 A 辑, 2000, 30(S1): 136–139
- 13 Adamec V, Calderwood J H. Electrical conduction in dielectrics at high fields. J Phys D Appl Phys, 1975, 8: 551–560
- 14 Frederickson A R, Brautigam D H. Mining CRRES IDM pulse data and CRRES environmental data to improve spacecraft

- charging/discharging models and guidelines. NASA/CR-2004-213228. 2004
- 15 NASA. Mitigating in-space charging effects—A guideline. NASA-HDBK-4002A. 2011
- 16 Wrenn G L, Rodgers D J, Ryden K A. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging. *Ann Geophys*, 2002, 20: 953–956
- 17 张振龙, 全荣辉, 韩建伟, 等. 卫星部件内部充放电实验与仿真. *原子能科学技术*, 2010, 44(增刊): 538–544

Study on internally dielectric charging of multilayer circuit board

WANG JianZhao, CHEN HongFei, YU XiangQian, ZOU Hong & SHI WeiHong

Institute of Space Physics and Applied Technology, Peking University, Beijing 100871, China

Based on the ESA's FLUMIC2, which is an electron spectrum model for high earth orbits, we use the Monte Carlo method and the radiation-induced conductivity (RIC) model to simulate the internal charging process of the multilayer FR4 printed circuit board (PCB) which is shielded by 2 mm aluminum and on the geosynchronous orbit (GEO). The simulation calculates the electric field deep in the PCB. The field is decreased by 54% of the four-layer PCB with the conducted layers grounded comparison to the two-layer grounded PCB. It shows that the multilayer PCB can mitigate the risk of the charging-discharging effect. The constant of the charging time does not depend on layers of PCB but depends on the properties of the dielectric. The electric currents of the grounding layers are about $90\sim 150\text{ pA m}^{-2}$ for two-layer PCB, while are $10\sim 100\text{ pA m}^{-2}$ for four-layer PCB. It depends on the electron flux and the properties and thickness of the dielectric layer.

internal charging, radiation-induced conductivity, Geant4, Monte Carlo method, geosynchronous orbit

doi: 10.1360/N092014-00046