

# 基于 Geant4 的介质深层充电电场计算<sup>\*</sup>

秦晓刚<sup>1)†</sup> 贺德衍<sup>1)</sup> 王 骥<sup>2)</sup>

1) 兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000)

2) 真空低温技术与物理国家重点实验室, 兰州 730000)

(2008 年 5 月 18 日收到, 2008 年 6 月 23 日收到修改稿)

基于 Geant4 模拟了电子在 Teflon 介质中的电荷输运过程, 获得了其内部的电流密度、剂量率和电荷沉积量沿深度的分布曲线, 进而利用电荷连续性方程、泊松方程和深层俘获方程求解出 Teflon 中高能、小束流电子辐照下的电场分布. 将介质平板充电过程简化为屏蔽铝板与分层介质组成的 Geant4 模型, 电子源为 1.0 MeV, 0.1 pA/cm<sup>2</sup> 的平面源. 通过记录经过各层介质的电子电量和各层介质内沉积能量和电子数目, 用统计平均的方法获得了介质内电流密度、剂量率和电荷沉积量沿深度的分布规律. 介质内电场计算采用辐射诱导电导率模型, 计算了介质不同表面接地条件下的电场分布. 结果表明, 相同条件下背面接地将获得比正面接地更高的电荷密度、电场和电势, 更容易发生内放电现象. 由于采用了与空间内放电一致的临界条件, 计算所得电场也与材料发生放电的阈值(10<sup>7</sup> V/m)接近, 获得的电场与实际相符.

关键词: 卫星, 介质深层充电, Geant4, 电场

PACC: 9480

## 1. 引 言

目前普遍认为卫星充电是地球同步轨道卫星产生故障和异常的一个重要原因, 而介质深层充电的研究是其中一个很活跃的领域. 介质深层充电指高能电子穿透卫星表面蒙皮以及其他屏蔽层后沉积到介质材料内部的现象, 介质深层充电会对卫星运行的安全性和可靠性产生严重影响. 当高能电子注入到卫星内部同轴电缆或电路板等介质材料中会引发绝缘介质内部的放电和击穿, 其产生的放电信号会耦合入卫星的其他电路会造成数据翻转、错误的指令和数据, 产生不可预料的后果. 随着卫星技术的发展, 卫星壳体厚度不断减薄, 星上使用的新材料的种类不断增加, 使用的仪器也越来越精密, 这些新技术的采用都对内带电的防护和设计提出了更高的要求.

一般认为卫星介质深层充电是由能量在 0.1—10 MeV 的空间高能电子造成的, 当电子在电阻率很高的介质材料中沉积时, 由于电子的迁移率很小, 电荷将很难泄放, 并且在材料内积累成为空间电荷, 建

立内部电场. 当介质材料内电子积累的速率超过泄放的速率, 空间电荷的密度和内部电场强度会随注入时间延续逐渐增加, 超过材料的击穿阈值时, 就会发生内放电. 介质充电的基本物理过程为入射电子不断沉积和已沉积电子建立电场形成泄漏电流二者之间的平衡过程<sup>[1]</sup>. 空间和地面试验数据研究表明, 介质内部电场是其放电的根本原因<sup>[2]</sup>. 文献 [3] 和 [4] 利用近似辐射通量公式系统地计算了平板和圆柱结构不同接地方式下的介质电场分布, 获得的结果与欧空局内放电分析和评估软件 DICTAT 结果接近. 但本质上该方法属解析方法, 文献 [5] 归纳了使用该方法对不同电子能谱、介质厚度和接地方式下的计算结果. 文献 [6] 基于 EGS4 蒙特卡罗模拟方法获得介质中的一维电流密度, 采用欧姆定律获得了最大电场, 并研究了入射能量、屏蔽厚度和介质厚度对介质内最大电场的影响规律, 但是该方法简化较多且未考虑介质中电场随时间的变化过程. 因此, 本文通过蒙特卡罗工具 Geant4 模拟出电子在介质中的输运过程获得电子沉积量和电子通量, 进而采用辐射诱导电导率(RIC)模型计算了介质内部电场, 同时考虑电子在介质中传输的细节问题和介质

<sup>\*</sup> 真空低温技术与物理国家重点实验室基金(批准号 9140C550304080C5501)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: qingxiaogang@yahoo.com.cn

电场随时间和边界条件的变化。

## 2. 介质深层充电过程的 Geant4 模拟

如图 1 所示,空间介质深层充电大多是在一定能谱和通量下的电子穿过卫星屏蔽结构后,入射到绝缘体上形成的,其中卫星上常用的屏蔽材料是铝板,介质包括聚四氟乙烯(Teflon 或 PTFE)、环氧树脂(Epoxy)和氟化乙丙烯(FEP)等。内带电常用的电子能量-通量谱模型有 GEO 最恶劣环境(worst-case GEO)<sup>[7]</sup>、FLUMIC 和 POLE 等,地面模拟中采用的能谱有单能电子、GEODUR 和 REEF。本文只对单能电子垂直入射情况进行计算来模拟地面电子加速器试验条件,同时根据文献[7],内带电电子通量大于 0.1 pA/cm<sup>2</sup>(或 10 h 内 3 × 10<sup>10</sup> e/cm<sup>2</sup>)时就需要进行屏蔽以避免内放电异常,因此屏蔽厚度取 0 mm,入射束流为 0.1 pA/cm<sup>2</sup>。经过铝板后束流不降低,进入介质后几乎被完全吸收,而介质暴露于电子通量大于 1 pA/cm<sup>2</sup> 的环境中时将会导致内放电问题,电子能量取 1 MeV;另外针对空间内放电发生的实际情况,模拟中还取铝屏蔽厚度 1.5 mm、电子能量 2 MeV 进行计算。

建立如图 2 所示的介质内充电 Geant4 模型,介质面积 4 mm × 4 mm,厚度 4 mm,材料选为 Teflon,并将其划分为 100 层进行蒙特卡罗统计,单层厚度 0.04 mm;屏蔽材料为铝,面积为 10 mm × 10 mm,厚度对不同情况分别取 0 mm 和 1.5 mm,屏蔽材料与介质材料之间距离为 5 mm。入射电子能量为单能 1 MeV 或 2 MeV,入射方向垂直于屏蔽材料,且从屏蔽材料正前方随机入射,大小与屏蔽面积相同,即用有效大小面积近似形成一个面电子源。由于实际束流密度下入射电子数目太多(约为 10<sup>10</sup>),而随着模拟电子数目增加统计量比例增加,因此这里 Geant4 的粒子数设为 10<sup>5</sup> 个,然后换算为实际入射情况。单能电子入射所获得沉积能量、沉积电荷和表面电流密度分布如图 3 所示。

由于其中的统计量会随着入射电子数目增加而比例增大,因此使用时必须归一化为实际入射电子束流的相应统计量。设入射电流密度为  $J_i$  (A/m<sup>2</sup>), Geant4 模型中粒子源面积为  $A_i$  (m<sup>2</sup>),入射粒子数为  $E_N$  (e<sup>-</sup>),电子电量为  $e_Q$  (= 1.6 × 10<sup>-19</sup> C),那么模拟的“时间”为

$$T_v = \frac{E_N e_Q}{J_i A_i} \text{ (s)}, \quad (1)$$

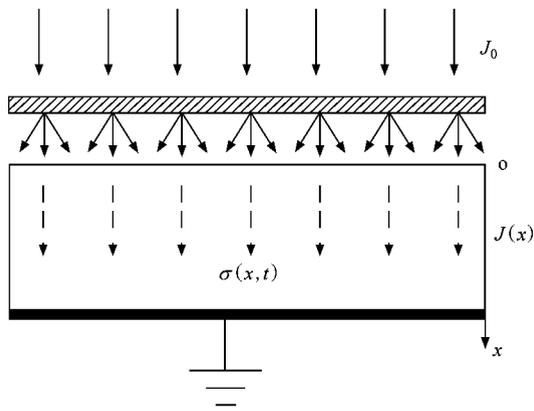


图 1 介质空间内带电模型(背面接地)

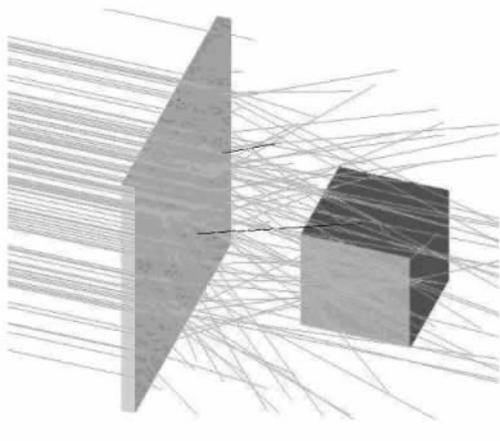


图 2 Geant4 介质内带电分层模型

进一步,设模型中介质密度为  $\rho_m$  (kg/m<sup>3</sup>),面积为  $A_m$  (m<sup>2</sup>),每层厚度为  $\Delta x$  (m),模拟获得的注入电量密度为  $E_{gs}^f$  (e<sup>-</sup>/m<sup>2</sup>),沉积能量为  $E_{gs}^e$  (MeV),沉积电荷量为  $E_{gs}^c$  (e<sup>-</sup>),那么介质中注入电流密度、剂量率和沉积电荷密度可分别按(2)~(4)式计算:

$$J_i(x) = \frac{E_{gs}^f e_Q}{T_v} \text{ (A/m}^2\text{)}, \quad (2)$$

$$\dot{D} = \frac{D}{T_v} = \frac{E_{gs}^e e_Q \times 10^8}{T_v \rho_m A_m \Delta x} \text{ (rad/s)}. \quad (3)$$

$$J_d(x) = \frac{E_{gs}^c e_Q}{T_v A_m} \text{ (A/m}^2\text{)}. \quad (4)$$

根据空间发生放电的最小电流密度选取实际入射的单能电子通量为  $J_i = 0.1$  pA/cm<sup>2</sup>,即单位时间内、单位屏蔽面积上入射电子数目为 6.25 × 10<sup>5</sup> 时,电子能量取 1 MeV,无屏蔽铝板时介质中的注入电流密度、剂量率和沉积电荷密度分布分别如图 4—6 所示。

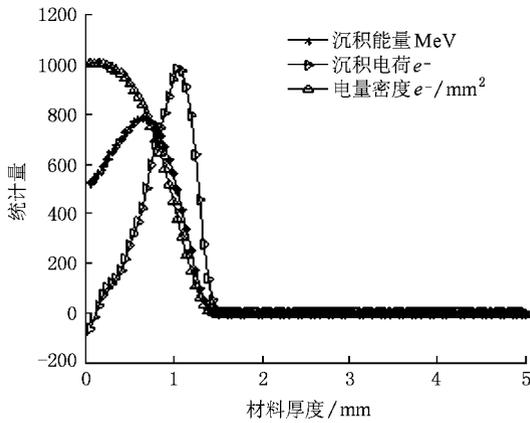


图 3 1.0 MeV 电子垂直入射到 Teflon 的统计量

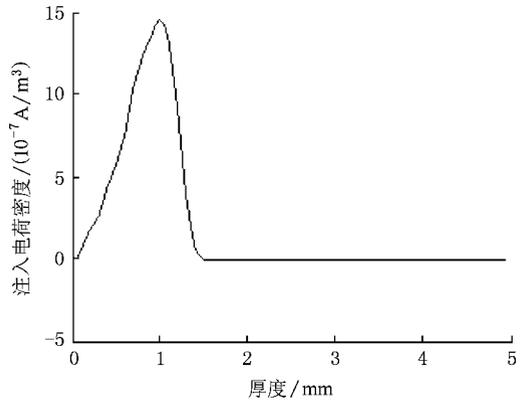


图 6 沉积电荷量分布

组成,分别为电流密度连续性方程、泊松方程和深层俘获方程<sup>[8]</sup>,即

$$\epsilon \frac{dE(x,t)}{dt} + [\sigma(x) + \mu_- \rho_f(x,t)] \times E(x,t) + \mathcal{K}(x) = J_0(t), \quad (5)$$

$$\epsilon \frac{dE(x,t)}{dx} = \rho_f(x,t) + \rho_i(x,t), \quad (6)$$

$$\frac{d\rho_f(x,t)}{dt} = \frac{\rho_f(x,t)}{\tau_-} \left( 1 - \frac{\rho_f(x,t)}{\rho_m} \right), \quad (7)$$

式中  $\epsilon$  为材料的介电常数,  $\mu_-$  为自由电荷迁移率,  $\tau_-$  为自由电荷俘获时间常数,  $\rho_m$  为最大俘获电荷密度,  $E(x,t)$ ,  $\rho_f(x,t)$  和  $\rho_i(x,t)$  分别为待求介质内  $t$  时刻  $x$  处的电场、自由电荷密度和俘获电荷密度,  $\mathcal{K}(x)$  是  $x$  处入射粒子通量,这里通过 Geant4 模拟获得,  $J_0(t)$  为电子辐射注入电流密度.  $\sigma$  为材料的电导率,在辐射条件下与剂量率相关,可表示为

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_r = \sigma_d + k\dot{D}^\Delta, \quad (8)$$

式中  $\sigma_d$  为暗电导率或本征电导率,  $\sigma_r$  为辐射诱导电导率,  $k$  和  $\Delta$  为辐射诱导电导率的系数和指数,  $\dot{D}$  为剂量率. 将前面计算得到的  $0.1 \text{ pA/cm}^2$  单能 1.0 MeV 入射的沉积能量或剂量(图 5)代入(8)式中,可得如图 7 所示的介质内部辐射诱导电导率分布.

由(5)–(8)式组成的 RIC 模型是一个初始-边值问题,设初始时介质从未辐照过,内部没有电场或多余电荷,同时对不同的接地方式,接地侧电势为 0,而非接地侧电场为 0<sup>[4]</sup>,即初始条件和边界条件分别为

$$\begin{aligned} E(x,0) &= \rho_f(x,0) = \rho_i(x,0) = 0, \\ E(0,t) &= 0, \quad (\text{正面接地}), \\ E(l,t) &= 0, \quad (\text{背面接地}). \end{aligned} \quad (9)$$

利用(5)–(8)式进行数值求解即可获得介质内

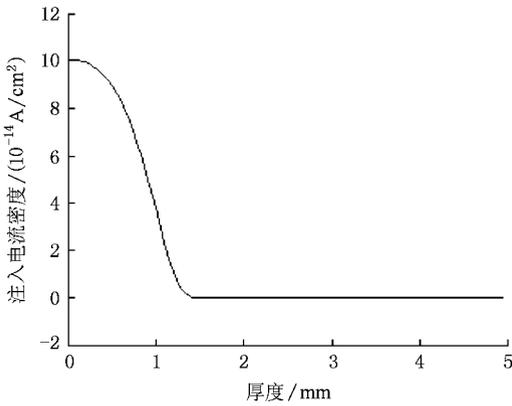


图 4 注入电流密度分布

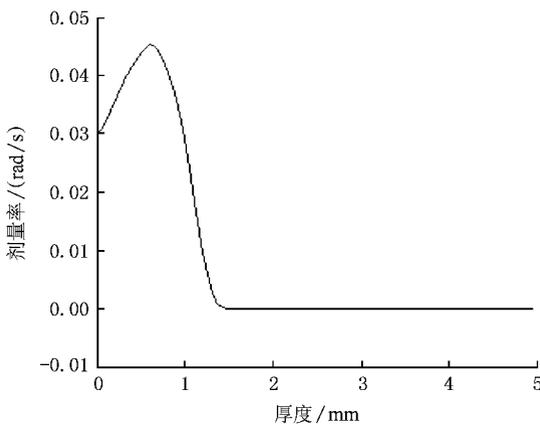


图 5 剂量率分布

### 3. 电场分布

介质内带电的一维解析 RIC 模型组由 3 个方程

电荷分布、电场分布和电势分布。对 Teflon, 计算中取  $\epsilon = 2.1 \times 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $\mu = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/(\text{Vs})$ ,  $\tau = 1 \text{ s}$ ,  $\rho_m = 8 \times 10^3 \text{ C/m}^3$ . 计算结果如图 8—10 所示, 星号为背面接地, 实线为正面接地。

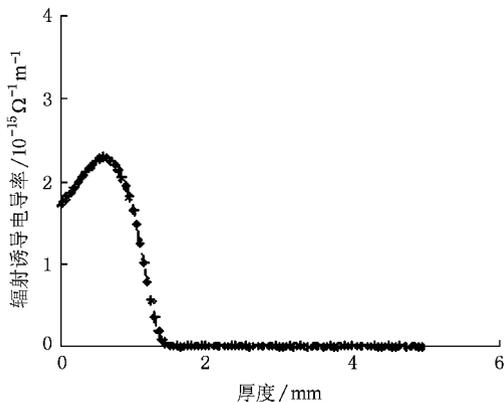


图 7 辐射诱导电导率分布

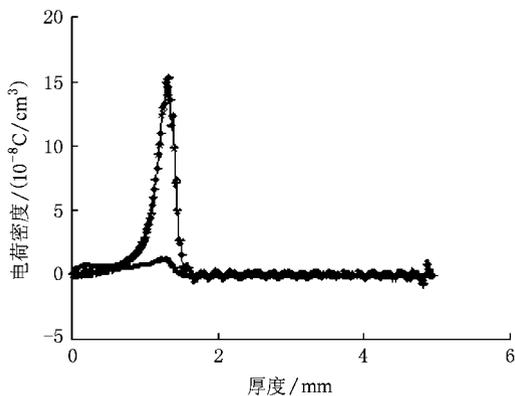


图 8 稳态时介质内电荷密度分布(12 h)

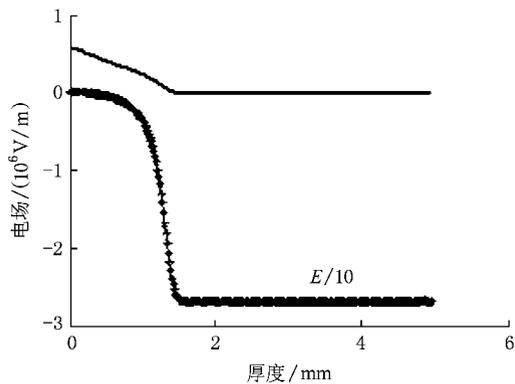


图 9 稳态时介质内的电势分布(12 h)

对于单能电子入射时介质电场在辐射正面和内部放电容易发生在辐射一侧表面, 内部的电场比表

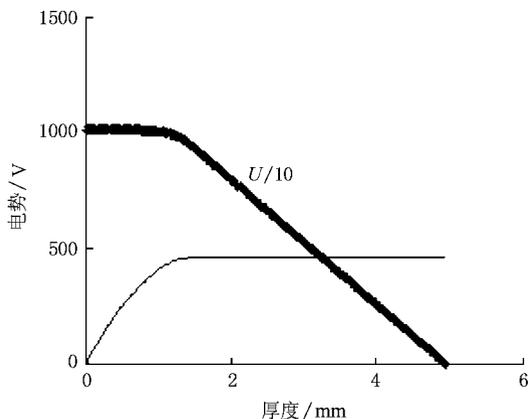


图 10 稳态时介质内电场分布(12 h)

面低。如果介质内放电的阈值电场为  $10^6 \text{ V/m}$ , 1.0 MeV 电子在通过 0 mm 铝板后辐射到 Teflon 介质上时基本不存在内放电的危险。同理对无屏蔽电子能量为 1 MeV、束流密度为  $1 \text{ pA/cm}^2$  和 1.5 mm 铝屏蔽电子能量为 2 MeV、束流密度为  $1 \text{ pA/cm}^2$  两种情况进行模拟计算, 获得背面接地时的电荷密度和电场分别如图 10—12, 其中虚线为 1 MeV 时的模拟计算结果, 实线为 2 MeV 时的模拟计算结果。

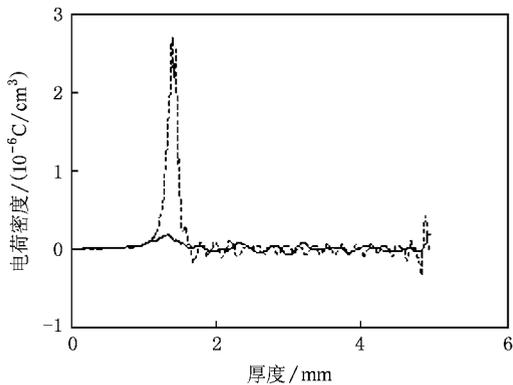


图 11 介质内部电荷密度分布对比(12 h)

从图 7—12 可以看出, 在单能电子辐照下,  $0.1 \text{ pA/cm}^2$  的无屏蔽介质经过 12 h 才会接近放电, 而  $1 \text{ pA/cm}^2$  时则会在 3 h 内超过  $10^7 \text{ V/m}$  发生放电, 但是当增加了 1.5 mm 屏蔽后与  $0.1 \text{ pA/cm}^2$  的情形接近, 基本不会发生内放电。这与文献 [7] 中空间试验的一般性结论一致, 说明模拟计算过程与实际较为接近。在直接利用现有材料物形参数的情况下获得了比较准确的结果。这里直接模拟了 1 MeV 以上能量的电子辐射过程, 而不是局限于文献 [8] 中 0.1 MeV 以下能量电子的研究, 解决了内带电电场预测的问

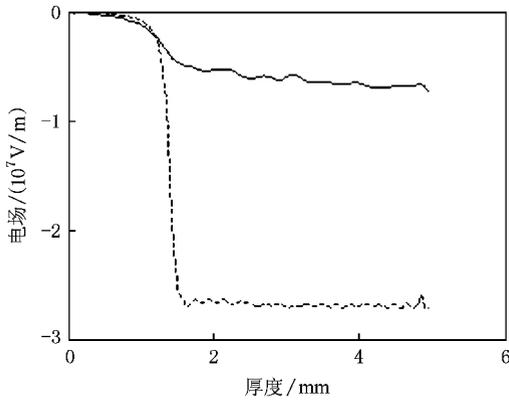


图 12 介质内部电场分布对比(12 h)

题,其意义在于将 Geant4 与 RIC 模型相结合用于模拟介质内带电问题,初步预测放电是否发生,为某些介质结构改进设计提供分析基础。

## 4. 结 论

基于 Geant4 模拟了电子在 Teflon 介质中的电荷输运过程,获得了电流密度、剂量率和电荷沉积量沿深度的分布曲线,进而利用 RIC 解析模型求解出不同接地方式下内带电介质中稳态电荷分布、电场分布和电势分布。选取文献 [7] 中的一般性条件进行的计算表明,在单能电子辐照下,  $0.1 \text{ pA/cm}^2$  的无屏蔽介质经过 12 h 才会接近放电阈值  $10^7 \text{ V/m}$ ,而  $1 \text{ pA/cm}^2$  时则会在很短的时间发生放电,模拟结论与试验结论一致。可见,采用 Geant4 模拟和 RIC 模型能够精确获得介质内充电高能量、弱束流条件下的电场和电荷密度分布,获得的结果直接与已有结论一致,其中电场可用于判定内放电是否会发生,对星上结构设计优化具有重要意义,而后者结果可在进一步工作中通过电荷测量加以验证。

- [1] Huang J G, Chen D 2004 *Chinese Journal of Space Science* **24** 346 (in Chinese) [黄建国、陈 东 2004 空间科学学报 **24** 346]
- [2] Frederickson A R 1993 *IEEE Trans. on Nuc. Sci.* **40** 233
- [3] Huang J G, Chen D 2004 *Chin. Phys.* **53** 961 (in Chinese) [黄建国、陈 东 2004 物理学报 **53** 961]
- [4] Huang J G, Chen D 2004 *Chin. Phys.* **53** 1611 (in Chinese) [黄建国、陈 东 2004 物理学报 **53** 1611]
- [5] Huang J G, Chen D 2004 *Chinese. J. Geophys.* **47** 392 (in

- Chinese) [黄建国、陈 东 2004 地球物理学报 **47** 392]
- [6] Gao B R, Hao Y Q, Jiao W X 2004 *Chinese Journal of Space Science* **24** 289 (in Chinese) [高柄荣、郝永强、焦维新 2004 空间科学学报 **24** 289]
- [7] Mulville D R 1999 *Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects* NASA-HDBK-4002
- [8] Sessler G M 1992 *IEEE Trans. on Elect. Insul.* **27** 961

# Geant4-based calculation of electric field in deep dielectric charging \*

Qin Xiao-Gang<sup>1,2)†</sup> He De-Yan<sup>1)</sup> Wang Ji<sup>2)</sup>

1) ( School of Physical Science and Technology , Lanzhou University , Lanzhou 730000 , China )

2) ( National Key Lab. of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics , Lanzhou 730000 , China )

( Received 18 May 2008 ; revised manuscript received 23 June 2008 )

## Abstract

Based on Geant4 particle transfer simulation , the internal current density , dose rate and charge deposition profiles of Teflon are acquired , and then the electric field under high energy and low density e-beam radiation is calculated with radiation-induced conductivity model of charging dynamics , which includes the continuity equation , Poisson equation and deep trap equation. According to Geant4 package , the charging model of dielectric is simplified as a compound structure consisting of shielding aluminum and multiple-layer plates radiated by 1.0 MeV energy and 0.1 pA/cm<sup>2</sup> flux density surface source. With statistical method , the distributions of internal current density , dose rate and charge deposition are obtained and normalized with the above flux density. Substituting these results into RIC model , the distributions of electric field in Teflon are calculated under various grounding conditions. It shows that the charge density , electric field and potential for the back side grounding are higher than these for the front side grounding , which tends to induce internal discharging. The electric field calculated for the critical internal discharging conditions in space is also consistent with the threshold field of dielectric Teflon ( 1e7 V/m ).

**Keywords :** satellite , deep dielectric charging , Geant4 , electric field

**PACC :** 9480

\* Project supported by the National Key Lab. of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics Fund ( Grant No. 9140C550304080C5501 ).

† Corresponding author. E-mail : qingxiaogang@yahoo.com.cn