

空间多能电子辐照聚合物充电过程的稳态特性*

刘婧† 张海波

(西安交通大学, 电子科学与技术电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2014年2月25日收到; 2014年3月25日收到修改稿)

空间同步轨道上多能电子辐照聚合物的充电过程及其稳态特性是研究和抑制通信卫星静电放电的基础. 在同步电子散射-输运微观模型的基础上, 采用具有10—400 keV积分能谱分布的多能电子辐照聚酰亚胺样品, 进行了多能电子辐照聚酰亚胺充电过程的数值模拟, 获得了空间电荷密度、空间电位、空间电场分布和聚合物样品参数条件下的表面电位和最大场强. 结果表明, 多能电子与样品发生散射作用并沉积在样品内形成具有高密度的电荷区域分布, 同时在迁移和扩散的作用下输运至样品底部形成样品电流; 充电达到稳态、电子迁移率较小时 (小于 $10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 表面电位绝对值和充电强度随电子迁移率的降低明显加强, 捕获密度较大时 (大于 10^{14} cm^{-3}), 表面电位绝对值和充电强度随捕获密度的增大明显加强; 聚合物样品厚度对表面电位和充电强度的影响大于电子迁移率、捕获密度和相对介电常数的影响. 研究结果对于揭示空间多能电子辐照聚合物的充电现象及微观机理、提高航天器故障机理研究水平具有重要科学意义和价值.

关键词: 空间辐照, 聚酰亚胺, 多能电子, 稳态特性

PACS: 94.05.Hk, 52.25.Fi, 61.80.Fe, 72.20.Jv

DOI: 10.7498/aps.63.149401

1 引言

空间同步轨道上多能电子辐照聚合物充电过程及其稳态特性的研究是空间技术、空间功能材料科学、空间辐照防护技术、通信卫星故障机理和航天器安全运行方面的一个重要研究课题^[1-6]. 空间中具有10—400 keV积分能谱分布的多能电子辐照聚合物形成电荷积累到一定程度引起的静电放电 (electrostatic discharge, ESD) 是导致航天器故障的重要成因之一^[1,7,8]. 另一方面, 多能电子辐照聚合物引起静电放电可导致聚合物材料性能退化和通过电磁脉冲干扰电子系统从而危害航天器安全^[9-13]. 特别地, 位于地球同步轨道上分布在10—400 keV的多能电子, 是导致航天器充电和静电放电的主要成因^[10,14]. 聚合物材料常被广泛应用于太阳能电池板和作为热涂层用于地球同步轨道卫星的电子系统和某些航天器部件中^[15,16]. 因

此, 为了很好地抑制和控制静电放电的发生, 研究空间多能电子辐照聚合物充电过程的稳态特性是深入研究静电放电的基础^[3,11,17-21].

对于复杂空间中的多能电子辐照聚合物的充电过程, 其充电的稳态特性是由入射电子束电流、离开样品的电子电流和样品电流之间的关系所决定的^[22-25]. 空间中高能电子产生的二次电子产额较低, 因此空间多能电子辐照聚合物的充电过程主要是由样品电流决定的, 同时充电过程受到聚合物样品参数的影响, 是一个很复杂的过程. 近年来, 空间多能电子辐照聚合物的实验方面主要测量了几种常用材料的聚合物和几种特定样品厚度条件下的表面电位结果^[26]. 数值模拟和理论研究通常是基于辐照诱导电导率 (radiation-induced conductivity, RIC) 模型^[3,26-28], 通过宏观电导率参数分析了聚合物样品厚度条件下的空间电荷分布^[3]. 鉴于空间多能电子辐照环境的复杂性和实验方法测量聚合物材料参数条件下充电特性的局限

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175140) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xjtu Liu jing@126.com

性, 综合考虑样品厚度、电子迁移率、捕获密度和介电常数条件下多能电子辐照聚合物的充电稳态特性研究仍比较缺乏.

本文在 高能电子辐照聚合物的 散射-运输模型 工作的基础上 [22,23,29,30], 建立了具有地球同步轨道卫星电子能谱分布的多能电子辐照聚合物的充电过程模型. 多能电子的散射过程采用蒙特卡罗数值模拟方法 [31]. 电荷输运过程考虑复杂的扩散、迁移、捕获和概率复合的过程, 其中捕获过程是基于 Poole-Frenkel 效应的捕获截面来实现的 [32,33]. 计算了多能电子辐照聚合物的内部空间电荷分布、空间电位、空间电场和聚酰亚胺样品参数条件下的表面电位和最大场强.

2 模型

图 1 给出了多能电子辐照聚酰亚胺 (Kapton) 样品的简化模型以及相关的电流密度示意图. 这里, 假设聚酰亚胺样品为具有正方形均匀表面的立方体, 样品厚度为 H , 样品底部为接地导电衬底. 假设多能电子垂直照射在聚酰亚胺样品表面. 多能电子沿样品深度方向照射. 多能电子的能量范围在 10—400 keV 之间, 多能电子的能量段分布符合法国国家航空航天科研局 (ONERA) 的地球同步轨道 (GEO) 电子能谱分布理论公式 [26], 文中主要通过设定符合地球同步轨道电子能谱的随机数模拟多能电子照射聚酰亚胺样品, 图 1 中 J_n , J_h , J_s , J_E 和 J_D 分别是电子电流密度、空穴电流密度、样品电流密度、泄漏电流密度和位移电流密度.

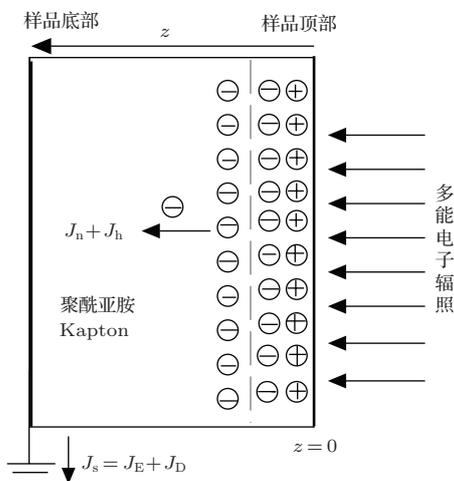


图 1 多能电子辐照聚合物样品示意图

2.1 多能电子的散射

在 高能电子辐照聚合物的 同步电子散射-运输模型 工作基础上 [22,23], 结合 ONERA 的 GEO 电子能谱分布理论公式和欧空局 (SIRENE) 机构的地面模拟空间电子辐照的实验方法, 建立了基于地球同步轨道电子能谱分布的空间多能电子的散射模型. 这里, 为了降低数值模拟的计算时间, 首先建立 10—400 keV 电子能量的散射数据库, 其次通过随机提取已有散射数据库再进行电荷输运模拟.

参照 SIRENE 机构的地面模拟实验方法 [34], 本文的多能电子是通过两个单能电子束实现的. 具体来说, 第一个单能电子束为 20 keV 的电子能量和 250 pA/cm² 的束流密度. 第二个电子束为具有 10—400 keV 积分能谱分布的多能电子能量段, 束流密度为 50 pA/cm². 通过数值模拟方法和 C++ 编程共同实现多能电子的散射-运输过程, 这里多能电子分布符合地球同步轨道电子能谱的理论公式 (1) [34]. 地球同步轨道电子能谱的理论公式常被用来研究地球同步轨道的电子造成的空间充电问题 [34]. 本文数值模拟中采用的多能电子积分能谱分布的理论公式为

$$J(> E_B) = 9.52 \times 10^7 \times \exp\left(-\frac{E_B}{E_a}\right) + 2.8 \times 10^9 \times \exp\left(-\frac{E_B}{E_C}\right), \quad (1)$$

其中, E_B 是多能电子的能量, $J(> E_B)$ 为多能电子对应的电子束流密度分布, E_a 和 E_C 为入射多能电子 E_B 的参考电子能量, 分别为 268.64 keV 和 44.16 keV. 电子的弹性散射和非弹性散射过程采用蒙特卡罗模拟来实现 [31], 这部分已经在过去的工作中介绍 [35].

2.2 电荷输运与捕获

多能电子辐照聚酰亚胺样品后首先与原子发生散射和电离作用, 沉积在样品内的大量的电子和空穴在电荷浓度差异下进行扩散, 同时在自洽电场影响下进行迁移, 形成局部具有高密度区域的电荷分布, 其中, 部分高能电子会穿透聚酰亚胺样品. 捕获过程是通过基于 Poole-Frenkel 效应的捕获截面来实现的. 另外, 聚合物中的电子空穴对会发生一定概率的复合. 电荷在扩散、迁移、捕获和复合共同作用下的运动就是电荷的输运过程.

捕获过程存在捕获和去捕获两种效应,但是大量的实验结果表明^[36,37],捕获过程中的电荷会在样品中停留较长的时间,去捕获效应对输运过程影响较小.为简化计算和降低计算时间,文中不考虑去捕获效应对捕获过程的影响.

多能电子对聚合物的辐照是非聚焦型的,在样品表面横向线方向保持不变,文中只考虑多能电子辐照聚合物沿样品深度方向(即 z 方向)的影响.假设样品内部自由电子浓度 $n(z,t)$ 、捕获电子浓度 $n_{\text{trap}}(z,t)$ 、自由空穴浓度 $h(z,t)$ 、捕获空穴浓度 $h_{\text{trap}}(z,t)$ 、电子电流密度 $J_n(z,t)$ 、空穴电流密度 $J_h(z,t)$ 、空间电位分布 $V(z,t)$ 以及空间电场分布 $E(z,t)$ 满足由电流连续性方程、电荷输运方程、泊松方程和捕获方程组成的方程组^[23,35]:

$$\frac{\partial(n(z,t) + n_{\text{trap}}(z,t))}{\partial t} = \nabla \cdot J_n(z,t) / e - rn(z,t)h(z,t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h(z,t) + h_{\text{trap}}(z,t))}{\partial t} = -\nabla \cdot J_h(z,t) / e - rn(z,t)h(z,t), \quad (3)$$

$$J_n(z,t) = -e\mu_e n(z,t) \nabla V(z,t) + eD_e \nabla n(z,t), \quad (4)$$

$$J_h(z,t) = -e\mu_h h(z,t) \nabla V(z,t) - eD_h \nabla h(z,t), \quad (5)$$

$$\nabla^2 V(z,t) = -[h(z,t) + h_{\text{trap}}(z,t) - n(z,t) - n_{\text{trap}}(z,t)]e / \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (6)$$

这里, e 为电子电量 1.6×10^{-19} C; ε_0 是真空介电常数; ε_r 是样品相对介电常数,对于聚酰亚胺取3.45; r 是电子空穴的复合率,文中默认的数值为 10^{-15} $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; μ_e 和 μ_h 分别为电子的迁移率和空穴的迁移率; D_e 和 D_h 分别为电子扩散系数和空穴扩散系数.电子的迁移率和扩散系数满足Nernst-Einstein方程 $D_e = \mu_e k_B T / q$,其中, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度,文中取常温300 K.通常聚合物中空穴迁移率小于电子迁移率,本文在模拟中取 μ_h 为 $0.1\mu_e$.

捕获能力的大小主要是通过捕获密度与捕获截面乘积项所代表的捕获概率来决定的,文中不考虑去捕获的影响,这里的具体过程通过(7)和(8)式说明:

$$\frac{\partial(n_{\text{trap}}(z,t))}{\partial t}$$

$$= n(z,t)\mu_e E(z,t)S_e(N_e - n_{\text{trap}}(z,t)), \quad (7)$$

$$\frac{\partial(h_{\text{trap}}(z,t))}{\partial t}$$

$$= h(z,t)\mu_h E(z,t)S_h(N_h - h_{\text{trap}}(z,t)), \quad (8)$$

其中: N_e 和 N_h 分别为电子捕获密度和空穴捕获密度, S_e 和 S_h 分别为电子捕获截面和空穴捕获截面.

文中通过C++程序实现以上的充电过程,优化各种计算的参数,诸如计算时间步长和有限差分法网格等,计算一个样品参数(例如电子迁移率 10^{-11} $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下的充电过程达到稳态所需要的时间为6 h.

3 数值模拟结果与分析

多能电子辐照聚合物的充电特性与聚合物材料的电子迁移率、捕获密度、复合率和介电常数等参数有关.以下无特殊说明时,我们选取电子迁移率为 10^{-11} $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[36],空穴迁移率为 $\mu_h = \mu_e / 10 = 10^{-12}$ $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,复合概率 10^{-15} $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,捕获截面为 10^{-8} cm^2 ,捕获密度为 10^{14} cm^{-3} ^[32,36],相对介电常数 ε_r 为3.45,聚合物样品厚度25 μm 为全文默认参数.聚合物的样品参数对充电特性的影响在目前的实验和数值模拟中没有较为详细的报导,文中对各种参数对聚合物表面电位和充电强度的影响给出了较大参数范围条件下的结果.

3.1 数值模拟结果与实验数据的比较

图2为数值模拟结果与实验数据的比较^[26].其中,实验中聚酰亚胺样品的厚度为25 μm .在本文的数值模拟中,通过选择合适的样品参数,诸如电子迁移率为 10^{-11} $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,捕获密度为 10^{14} cm^{-3} 时,可以得到与实验数据一致的数值模拟结果,其中存在部分误差的主要原因可以归结为实验测量中某些聚合物样品参数的不确定性.

计算模型中也要同时考虑样品电流密度的产生.在空间辐照环境中,多能电子辐照聚合物的样品电流密度是样品泄漏电流和位移电流的叠加结果.多能电子辐照聚合物的充电过程随着流入和流出样品的电流逐渐趋于平衡.文中的多能电子分布主要在10—400 keV之间,这种情况下,二次电子产额小于1,多能电子辐照聚合物形成负充电,内部空间电荷分布总体为负,随着多能电子的辐照,样品

内部沉积的电子数量逐渐增多, 图2中得到的表面电位逐渐降低. 随着多能电子进一步辐照, 样品内部使得电子向下输运的电场逐渐增强, 更多的电子向样品底部运动, 经过一定的辐照时间到达样品底部形成泄漏电流. 需要注意的是, 聚合物样品的平衡机制会由样品厚度和入射电子能量的不同而有所差异 [22,38].

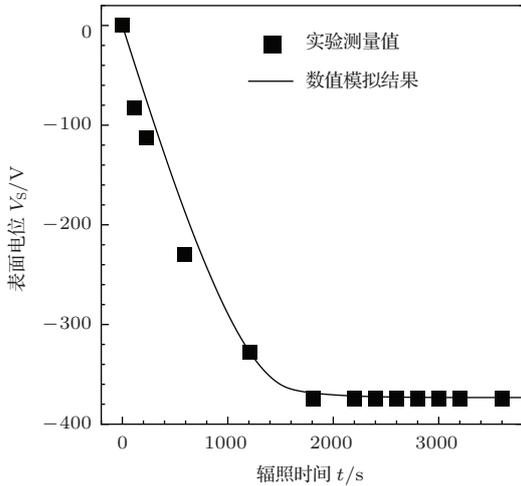


图2 表面电位数值模拟结果与实验数据的比较 [26]

3.2 空间电荷密度、空间电位和空间电场的分布

空间电荷分布是影响其充电过程的主要因素. 已知空间电荷分布能够确定空间电位和电场分布. 电子入射到聚合物样品后, 首先与样品发生的是快速的散射过程, 形成一定的散射分布. 图3为充电达到稳态时得到沿样品深度方向的空间电荷密度分布和电子密度分布. 辐照初期50 s, 辐照时间小于稳态时间, 空间电荷和电子高密度区峰值位置在

样品深度4 μm 处. 随着辐照时间增加到稳态时, 表面附近电子浓度有微弱的下降, 这主要是因为电子和空穴不断地复合, 但是样品表面存在微弱的正电场, 表面附近的电子又会不断地向表面迁移, 两种作用相互抵消, 所以样品表面电子浓度下降的幅度很小. 在样品内部, 随着辐照时间增加到3000 s, 电子积累得越来越多, 电子浓度相对于辐照初期有了大幅度的增加, 电子的高浓度区在迁移的作用下逐渐扩大, 此时已经扩展到样品底部, 峰值位置也向底面进一步移动. 在样品内部, 空穴的浓度相对于辐照初期反而下降, 这是因为复合的作用使大量的电子空穴对消失. 但是辐照沉积的电子数远远大于空穴数, 辐照产生电子的速度大于复合消除电子的速度, 所以电子浓度在复合之后仍能大幅增加. 辐照产生空穴的速度小于复合消除空穴的速度, 所以空穴的浓度会降低.

图3中电子密度峰值位置随时间的变化会大于空穴位置随时间的变化, 这是因为在内部负电场(取辐照方向为正方向, 即垂直于样品表面指向底部的方向)的作用下, 电子向样品底部迁移, 空穴向表面迁移, 而且电子的迁移率大于空穴, 所以同一时刻电子分布的变化速度大于空穴分布的变化.

图4所示为充电达到稳态时沿样品深度 z 方向的电子迁移率、样品厚度、捕获密度和相对介电常数条件下的空间电荷密度分布. 如图4(a)所示, 空间电荷峰值位置随电子迁移率的降低变化微小, 电子迁移率越小, 样品内总带电荷量越大. 如图4(b)所示, 样品厚度越大, 样品内电荷峰值没有明显变化, 但电荷沉积量随样品厚度的增加而加强. 样品厚度越大, 沉积在样品内的电荷量越大, 50 μm 样品厚度的总电荷沉积量明显要大于25 μm 和40 μm

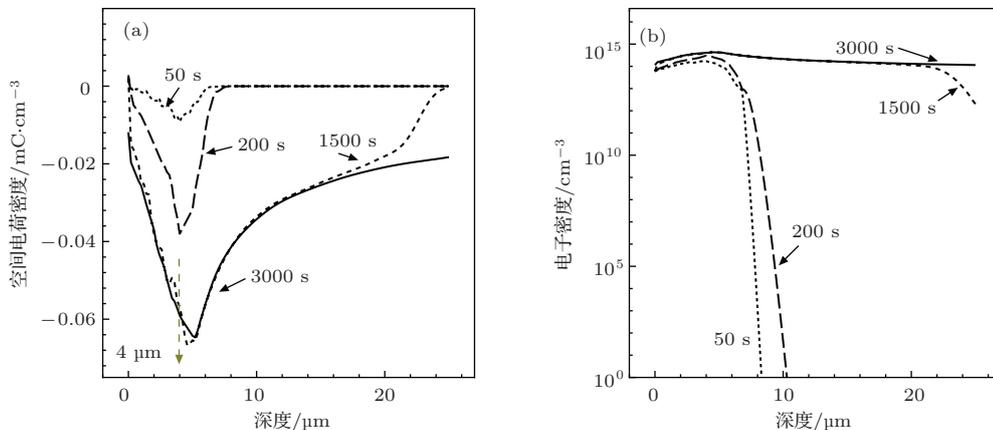


图3 多能电子辐照聚酰亚胺沿深度方向(a)空间电荷密度分布和(b)电子密度分布

的总电荷沉积量. 捕获密度越大, 样品内在迁移和扩散作用下, 输运到样品底部的电子越少, 因此样品内部沉积的电荷量越多, 如图 4(c) 所示, 当捕获密度为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时, 样品内负电荷沉积量明显增大. 由图 4(d) 可见, 样品内电荷密度随聚合物

相对介电常数的增大而增大, 空间电荷峰值位置随相对介电常数的减小, 向样品底部移动.

由图 5(a) 可见, 沿样品深度 z 方向, 电位随着样品深度增加而增大(电位绝对值变小), 最终到接地点变为零. 空间电位整体是负电位分布, 这是因

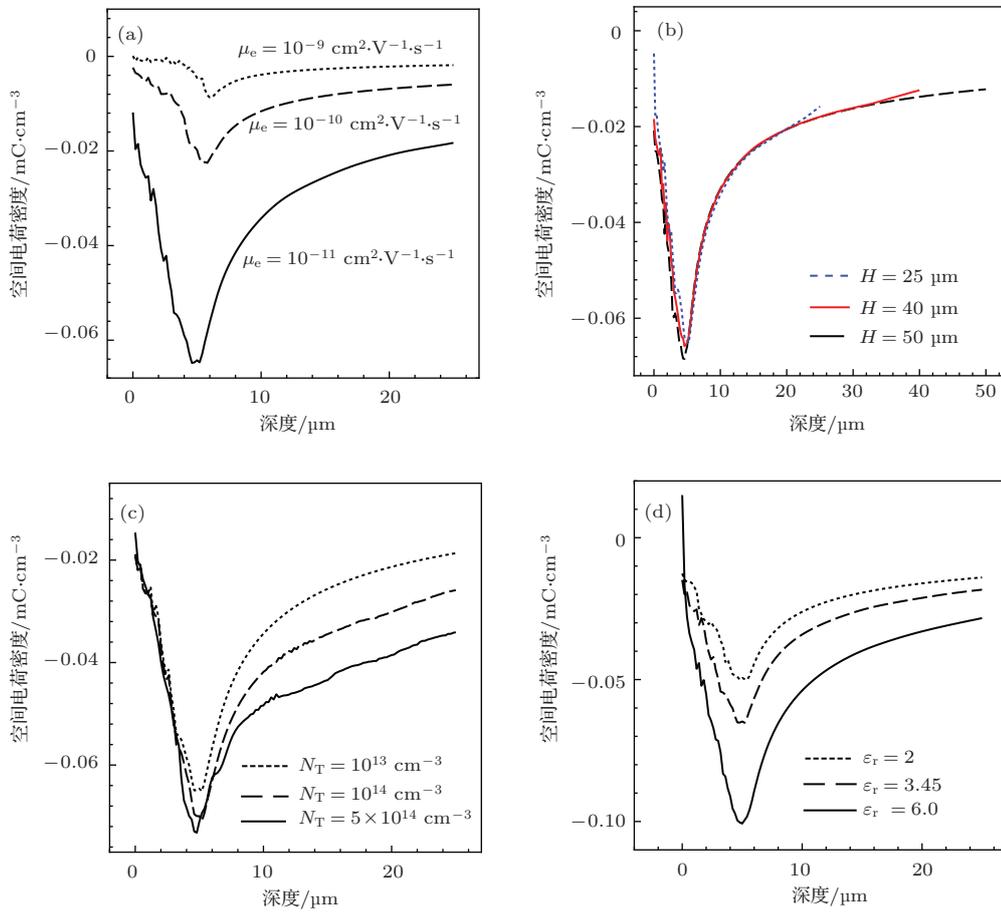


图 4 不同的辐照条件下 (a) 不同电子迁移率的空间电荷密度, (b) 不同样品厚度的空间电荷密度, (c) 不同捕获密度的空间电荷密度, (d) 不同相对介电常数的空间电荷密度

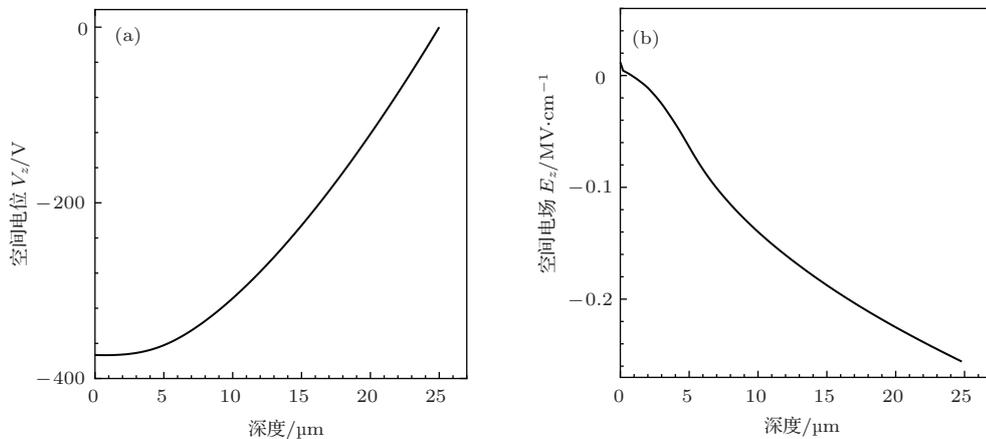


图 5 多能电子辐照聚酰亚胺沿深度方向 (a) 空间电位分布, (b) 空间电场分布

为样品内的总电荷密度为负. 图5(b)所示为通过空间电位分布得到的空间电场分布, 数值计算中无穷远处电位为零, 边界条件的假设只能近似实现, 所以电场并不是绝对的零值. 沿着样品辐照深度方向, 电场变为负值, 且电场沿着样品深度方向越来越强.

3.3 样品参数条件下的表面电位和充电强度

图6所示为表面电位和最大场强与样品厚度的关系. 对于多能电子辐照聚合物的情况, 表面电位随着样品厚度的增加而降低, 充电强度即最大场强随样品厚度的增加而加强. 首先, 样品厚度越薄时, 电子和空穴在样品内输运过程所需的时间越短, 充电暂态过程越短, 样品内沉积的总电荷量也越少; 其次, 样品厚度越薄, 越多的电子容易穿透聚合物样品, 沉积在样品内的电荷量越少, 样品厚度为15 μm时, 多能电子中大于40 keV的电子会穿透整个样品到达样品底部. 从以上分析可以得到图6所示结果, 15 μm样品的表面电位和充电强度要整体小于25, 40和50 μm的样品.

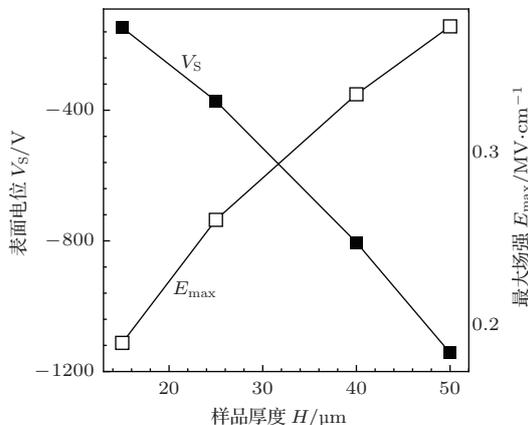


图6 表面电位和最大场强随样品厚度的变化

类似地, 电子迁移率也可以影响表面电位和最大场强. 如图7所示, 表面电位随电子迁移率的降低而降低. 原因是电子迁移率越小, 充电的暂态过程所需时间越长, 样品内沉积的电子浓度会随电子迁移率的降低而增多, 因而样品表面电位也会随电子迁移率的减小而降低.

最大场强随电子迁移率的增大而减小, 电子迁移率越大, 充电过程的暂态过程越短, 样品内积累的负电荷密度越少, 负充电强度越弱, 所以样品的

最大场强就越小. 本文研究中最大场强出现在样品底部, 主要原因是负电荷密度峰值在电子辐照过程中会向样品底部移动, 峰值逐渐变大, 表面电位变得越负, 最大场强随着样品深度的增加而增强.

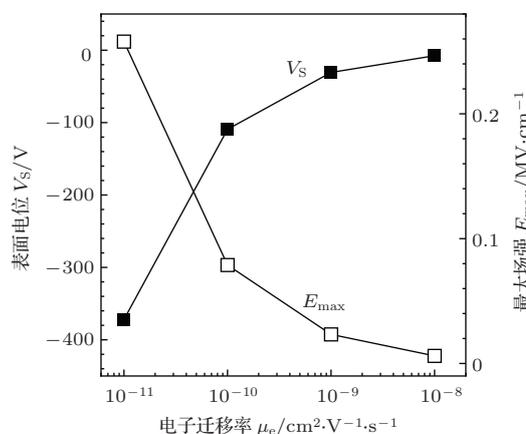


图7 表面电位和最大场强随电子迁移率的变化

入射电子的着地能量对表面电位会有影响, 当表面电位为负时, 实际入射进样品的电子能量小于电子的最初能量. 另外表面电位的大小决定着航天器表面是否产生静电放电, 所以有必要研究表面电位随着辐照时间的变化关系. 最大场强可以用来判断聚合物样品是否击穿, 当最大场强达到聚合物击穿阈值时, 聚合物样品可能被击穿, 其介电特性会发生很大的变化.

图8所示为捕获密度条件下的表面电位和最大场强, 表面电位随捕获密度的增大而降低, 最大场强随捕获密度的增大而加强. 捕获密度越大, 样品内部的负电荷密度越大. 捕获密度越大, 在样品的同一位置处被捕获的载流子浓度会增加, 自由载流子浓度就会下降. 大量的电子和空穴被捕获了而无法运动, 一方面增加了这一点的净电荷密度, 另一方面电子运动到样品底部的时间会变长, 即充电过程达到稳态所需时间会变长. 充电的暂态时间随着捕获密度的增加而增加, 在入射电子流条件不变的情况下, 样品内积累的总负电荷密度也随之增加, 所以最大场强和表面电位增加.

图9所示为聚合物相对介电常数条件下的表面电位和最大场强, 表面电位随介电常数的减小而降低, 最大场强随介电常数的减小而加强. 相对介电常数越大, 样品内部的负电荷密度越大. 相对介电常数越大, 相对于零电位的接地衬底, 意味着在样品内部相同数量的电子产生的电场强度会加大,

导致表面电位的绝对值会降低, 最大场强会降低.

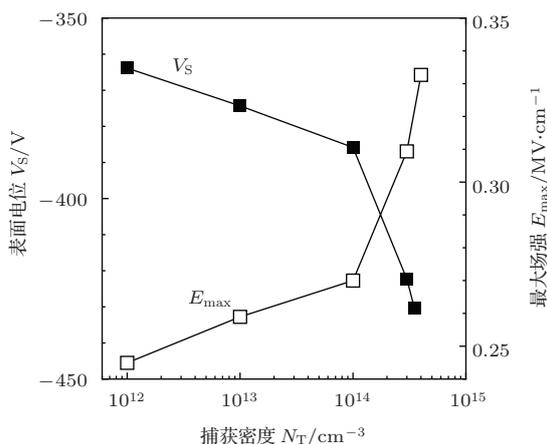


图8 表面电位和最大场强随捕获密度的变化

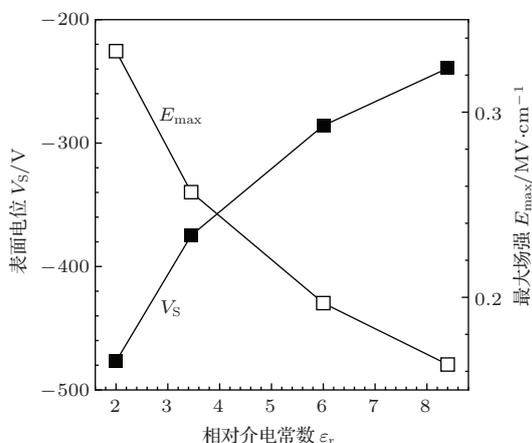


图9 表面电位和最大场强随相对介电常数的变化

4 讨论

1) 电子迁移率越小、样品越厚, 得到的负电荷密度峰值位置越靠近样品表面, 空间电位整体越呈现负充电. 表面电位绝对值和最大场强随着电子迁移率减小、样品厚度的增加和相对介电常数的减小而增大. 捕获密度对表面电位的影响相对于前三个样品参数较微弱, 变化捕获密度参数所造成的表面电位的变化范围都控制在本文默认参数得到表面电位结果的10%左右.

2) 离开样品的电子电流和样品电流是决定充电达到稳态的重要原因, 多能电子辐照聚酰亚胺样品后, 其中少量电子会穿透样品底部, 沉积在样品内的电子会通过迁移流入样品底部而损失掉, 表面电位逐渐趋向稳定. 结果表明, 样品电流及其特性是影响充电过程和充电强度的重要因素. 聚合物样品的电子迁移率越低、样品越厚、捕获密度越

大和相对介电常数越小, 多能电子辐照聚合物的充电强度均会越强. 因此多能电子辐照聚酰亚胺的充电过程和充电强度是由以上综合因素共同决定的.

3) 该研究尚存在一定的局限, 研究中涉及的多能电子的二次电子产额较低, 文中暂时没有考虑此部分的影响, 所以文中模拟得到充电强度结果比实际的充电强度结果要偏大. 同时, 多能电子辐照聚合物, 大量电子沉积在聚合物样品内部形成的空间电荷会在一定程度上改变聚合物电导率^[34]和导致聚合物材料的老化^[39]. 当样品厚度为几百微米到毫米量级时, 聚合物材料受多能电子辐照引起材料性能改变比较明显^[39], 文中研究样品主要为15—50 μm, 暂时没有考虑材料性能的影响, 后续研究工作中需要进一步完善.

5 结论

本文基于同步电子散射-输运模型, 研究了空间多能电子辐照聚酰亚胺的稳态充电特性. 主要得到以下结果: 首先, 电子射程大于样品厚度的电子在散射过程中会穿透样品, 降低样品充电量和缩短暂态的充电过程时间; 另外, 散射后沉积在样品内的电子会在迁移和扩散的作用下形成高密度的电荷区域, 最终在样品内部形成负电荷分布, 同时电子输运到样品底部得到样品电流; 其次, 聚合物表面电位绝对值和最大场强均会随样品厚度的增大而增大, 随电子迁移率的减小而增强, 随捕获密度的增大而增强, 随相对介电常数的减小而增强; 厚度的影响大于电子迁移率、捕获密度和相对介电常数对充电强度的影响; 最后, 多能电子中电子射程大于样品厚度的电子是影响充电过程达到稳态的另一因素, 电子射程大于样品厚度的高能电子将缩短充电的暂态时间和降低充电稳态时的总电荷积累量, 因此, 多能电子辐照聚合物的充电稳态特性是由样品电流、聚合物样品参数电子迁移率、样品厚度、捕获密度、相对介电常数和电子射程大于样品厚度的高能电子共同来决定的. 本研究工作和获得的结果有助于深入了解空间多能电子辐照聚合物的充电特性和微观机理, 对空间环境中多能电子辐照聚合物的一类问题的数值分析具有参考价值.

参考文献

- [1] Garrett H B, Whittlesey A C 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 2017
- [2] Li S T, Li G C, Min D M, Zhao N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059401 (in Chinese) [李盛涛, 李国倡, 闵道敏, 赵妮 2013 物理学报 **62** 059401]
- [3] Balmain K G 1986 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **21** 427
- [4] Gao Z X, Li H W, Cai M H, Liu D Q, Huang J G, Han J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039601 (in Chinese) [高著秀, 李宏伟, 蔡明辉, 刘丹秋, 黄建国, 韩建伟 2012 物理学报 **61** 039601]
- [5] Cao H F, Liu S H, Sun Y W, Yuan Q Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 119401 (in Chinese) [曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 原青云 2013 物理学报 **62** 119401]
- [6] Huang J G, Yi Z, Meng L F, Zhao H, Liu Y N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 099401 (in Chinese) [黄建国, 易忠, 孟立飞, 赵华, 刘业楠 2013 物理学报 **62** 099401]
- [7] Deforest S E 1972 *J. Geophys. Res.* **77** 651
- [8] Koons H, Mazur J, Lopatin A, Pitchford D, Bogorad A, Herschitz R 2006 *J. Spacecr. Rockets* **43** 178
- [9] Masui H, Toyoda K, Cho M 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2387
- [10] Czeremuszkin G, Latreche M, Wertheimer M R 2001 *Nucl. Instrum. Meth. B* **185** 88
- [11] Mateo-Velez J C, Inguibert V, Roussel J F, Sarraill D, Levy L, Boulay F, Laffont E, Payan D 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2395
- [12] Huang J G, Han J W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2907 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟 2010 物理学报 **59** 2907]
- [13] Quan R H, Zhang Z L, Han J W, Huang J G, Yan X J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1205 (in Chinese) [全荣辉, 张振龙, 韩建伟, 黄建国, 闫小娟 2009 物理学报 **58** 1205]
- [14] Griseri V, Perrin C, Laurent C 2009 *J. Electrostat.* **67** 400
- [15] Donegan M M, Sample J L, Dennison J R, Hoffmann R 2010 *J. Spacecr. Rockets* **47** 134
- [16] Miyake H, Tanaka Y, Takada T 2007 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **14** 520
- [17] Sarraillh P, Mateo-Velez J C, Roussel J F, Dirassen B, Forest J, Thiebault B, Rodgers D, Hilgers A 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 368
- [18] Takada T, Miyake H, Tanaka Y 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 2176
- [19] Paulmier T, Dirassen B, Payan D, Van Eesbeek M 2009 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **16** 682
- [20] Qin X G, He D Y, Wang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 684 (in Chinese) [秦晓刚, 贺德衍, 王骥 2009 物理学报 **58** 684]
- [21] Quan R H, Han J W, Zhang Z L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 245205 (in Chinese) [全荣辉, 韩建伟, 张振龙 2013 物理学报 **62** 245205]
- [22] Li W Q, Zhang H B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3219 (in Chinese) [李维勤, 张海波 2008 物理学报 **57** 3219]
- [23] Cao M, Wang F, Liu J, Zhang H B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127901
- [24] Yang W J, Li Y D, Liu C L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 087901 (in Chinese) [杨文晋, 李永东, 刘纯亮 2013 物理学报 **62** 087901]
- [25] Renoud R, Mady F, Attard C, Bigarre J, Ganachaud J P 2004 *Phys. Status Solidi A* **201** 2119
- [26] Dirassen B, Levy L, Reulet R, Payan D 2003 *Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment* Noordwijk, Netherlands Jun. 16–20, 2003 p351
- [27] Yasuda M, Kainuma Y, Kawata H, Hirai Y, Tanaka Y, Watanabe R, Kotera M 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 124904
- [28] Perrin C, Griseri V, Inguibert C, Laurent C 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 205417
- [29] Li W Q, Zhang H B 2010 *Appl. Surf. Sci.* **256** 3482
- [30] Zhang H B, Feng R J, Ura K 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 2011
- [31] Joy D C 1995 *Monte Carlo Modeling for Electron Microscopy and Microanalysis* (New York: Oxford University Press) p27
- [32] Cornet N, Goeriot D, Guerret-Piecourt C, Juve D, Treheux D, Touzin M, Fitting H J 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 064110
- [33] Touzin M, Goeriot D, Guerret-Piecourt C, Juve D, Treheux D, Fitting H J 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 114110
- [34] Molinie P, Dessante P, Hanna R, Paulmier T, Dirassen B, Belhaj M, Payan D, Balcon N 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 1215
- [35] Feng G B, Cao M, Yan L P, Zhang H B 2013 *Micron* **52–53** 62
- [36] Sessler G M, Figueiredo M T, Ferreira G F L 2004 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **11** 192
- [37] Sessler G M 1992 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **27** 961
- [38] Li W Q, Zhang H B 2010 *Micron* **41** 416
- [39] Zheng F H, Zhang Y W, Xia J F, Xiao C, An Z L 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 064105

Steady-state charging characteristics of polymer irradiated by multi-energetic electrons*

Liu Jing[†] Zhang Hai-Bo

(Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 25 February 2014; revised manuscript received 25 March 2014)

Abstract

Charging characteristics of polymer irradiated by multi-energetic electrons is a basis to study and prevent electrostatic discharge in space radiation environment. The polymer irradiated by multi-energetic electrons is modeled and simulated. The space charge distribution, surface potential, space potential, surface potential and maximum field strength under the condition of sample parameters are obtained. The results show that because of electron drift and diffusion, electrons can transit through the electron scattering region, forming negative space charges. Some electrons can flow to the substrate of polymer. In the equilibrium state, the surface potential of the film negatively charged decreases with film thickness and trap density increasing, and it increases with electron mobility and relative permittivity increasing. The maximum field strength increases with film thickness and trap density increasing, and it decreases with electron mobility and relative permittivity increasing. The high-energy electrons section of multi-energetic electrons will shorten the equilibrium of charging process.

Keywords: space radiation, polyimide, multi-energetic electrons, steady-state characteristics

PACS: 94.05.Hk, 52.25.Fi, 61.80.Fe, 72.20.Jv

DOI: [10.7498/aps.63.149401](https://doi.org/10.7498/aps.63.149401)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.11175140).

† Corresponding author. E-mail: xjtuliujing@126.com