

空间电子辐照聚合物的充电特性和微观机理

刘婧 张海波

Charging characteristics and micromechanism of space electrons irradiated polymers

Liu Jing Zhang Hai-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 059401 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181925

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181925>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电子辐照聚合物带电特性多参数共同作用的数值模拟

Numerical simulation of multi-combined effects of parameters on polymer charging characteristics due to electron irradiation
物理学报. 2015, 64(22): 227901 <https://doi.org/10.7498/aps.64.227901>

电场和温度对聚合物空间电荷陷阱性能的影响

Simulations of the effects of electric field and temperature on space charge traps in polymer
物理学报. 2017, 66(8): 87201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.087201>

电子辐照聚乙烯/碳纳米管拉伸变形机理

Tensile deformation mechanism of PE/CNTs irradiated by electrons
物理学报. 2016, 65(17): 178104 <https://doi.org/10.7498/aps.65.178104>

聚酰亚胺电导率随温度和电场强度的变化规律

Study on temperature and electric field dependence of conductivity in polyimide
物理学报. 2016, 65(2): 25201 <https://doi.org/10.7498/aps.65.025201>

一种新的航天器外露介质充电模型

A new charging model for exposed dielectric of spacecraft
物理学报. 2018, 67(19): 195201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180532>

摩擦导致的聚合物表层微观结构改变

Microstructure changes of amorphous polymer film induced by friction
物理学报. 2015, 64(6): 66801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.066801>

空间电子辐照聚合物的充电特性和微观机理*

刘婧^{1)2)†} 张海波²⁾

1) (电子科技大学资源与环境学院, 成都 610054)

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

(2018年10月29日收到; 2018年12月5日收到修改稿)

空间电子辐照聚合物的充电特性和微观机理是研究和防护航天器聚合物充放电特性的基础. 采用蒙特卡罗方法模拟空间电子的散射过程, 快二次电子模型模拟二次电子的产生, 有限差分法求解电荷连续性方程、电流密度方程和泊松方程的电荷输运过程, 俘获过程基于 Poole-Frenkel 效应来实现. 基于电子散射/输运同步模型基础, 结合法国国家航空航天科研局 (ONERA) 的地球同步轨道电子能谱分布理论公式和欧空局 (SIRENE) 机构的地面实验方法, 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. 通过空间电子辐照聚合物充电过程的数值模拟, 获得了空间电荷密度、电位、电场和空间电位分布. 阐明了空间电子辐照聚合物的充电特性和样品微观参数与表面电位的关联性. 表面电位特性与实验结果相吻合, 单能电子的电位强度高于多能电子的电位. 充电达到稳态时, 电子迁移率较小时 (小于 $10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 空间电位绝对值随电子迁移率的降低明显加强; 复合率较大时 (大于 $10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 空间电位绝对值随复合率的增大而增大. 研究结果对于揭示空间电子辐照聚合物的充电特性和微观机理、提高航天器充放电故障机理研究水平具有重要科学意义和价值.

关键词: 空间电子, 聚酰亚胺, 充电特性, 数值模拟**PACS:** 94.05.Hk, 52.25.Fi, 61.80.Fe, 72.20.Jv**DOI:** 10.7498/aps.68.20181925

1 引言

空间环境中电子辐照聚合物充电特性和微观机理的研究是空间技术、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^[1-10]. 据美国宇航公司的统计数据^[11], 可导致电介质性能退化和通过强电磁脉冲干扰电子系统的充电效应引起的静电放电 (electrostatic discharge, ESD) 占卫星异常事件的 54.2%, 成为危害航天器安全和影响航天器正常工作的主要原因. 航天器充电^[11] 有两种方式, 一是数十 keV 至数 MeV 高能电子引起的电介质深层充电 (内带电), 二是数十 keV 以下的低能电子及空

间等离子体的表面充电. 这里, 电子入射电介质后首先与原子发生散射和电离作用, 生成大量的电子和空穴, 形成局部具有等离子体特征的电荷密集区域. 局部等离子体会导致电子和空穴经输运和俘获作用在材料表层和深层形成一定的空间电荷分布, 在电介质材料形成空间电位和电场.

空间环境下电介质充电特性和微观机理的研究涉及众多因素, 是一个复杂的动态过程^[12-18], 需要进一步深入分析. 首先, 空间辐照环境既包括地磁亚暴、电离层等动态的大剂量暂变辐照过程, 又会发生稳定能量电子的低剂量辐照, 从而导致二次电子发射特性难以用著名的 Vaughan 公式^[14] 和 Furman 概率模型进行定量分析. 因此, 空间辐照环境、电介质材料特性、电介质表面电磁场等条件

* 国家自然科学基金 (批准号: 11805030) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xjtuliujing@126.com

影响下空间电荷积累和演变规律呈复杂现象^[19]. 另一方面, 空间电子能量分布不是单一性能量, 电子能谱分布随时间和空间环境发生变化, 从而导致复杂的电子散射与电荷输运动态过程. 电子导致深层充电的电荷输运通常包括电子和空穴的迁移、扩散、俘获与去俘获、复合等机理, 是一个复杂的动态过程^[20]. 电介质充电电流平衡机理受空间地磁环境、空间电子分布和电介质材料参数等多维物理场的影响, 需要进一步研究^[21]. 对于复杂空间中的多能电子辐照聚合物的充电过程, 其充电特性和微观机理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^[22-24]. 空间中高能电子产生的二次电子产额较低, 因此空间电子辐照聚合物的充电过程主要是由样品电流决定的, 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.

本文在单能电子辐照聚合物的散射/输运同步模型工作的基础上^[21,25-27], 建立了具有地球同步轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 电子能谱分布的空间多能电子辐照聚合物的充电过程模型. 分析和比较了空间多能电子和单能电子的散射和输运过程的充电特性和微观机理^[8]. 电荷输运过程考虑复杂的扩散、迁移、俘获和概率复合的过程, 其中俘获过程是基于 Poole-Frenkel 效应的俘获截面来实现的^[28,29]. 计算了空间电子辐照聚合物的空间电荷和聚酰亚胺样品参数条件下的空间电位.

2 模型

图 1 给出了空间电子辐照聚酰亚胺 (Kapton) 样品的简化模型以及相关的电流密度示意图. 这里, 假设聚合物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. 假设空间电子以非聚焦电子束垂直照射在聚酰亚胺样品表面. 空间电子沿样品深度方向照射. 空间电子的能量范围在 10—400 keV 之间, 分布区间为低、中、高能量段, 空间电子的能量段分布符合法国国家航空航天科研局 (ONERA) 的 GEO 电子能谱分布理论公式^[18], 文中主要通过设定符合 GEO 电子能谱的随机数模拟空间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.

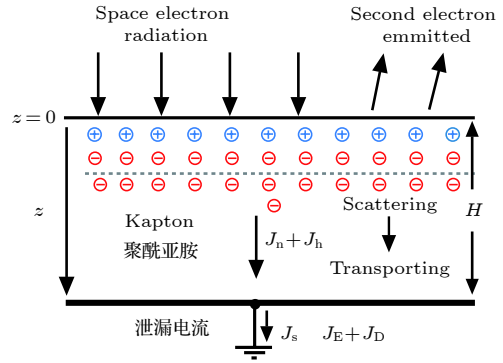


图 1 空间电子辐照聚酰亚胺 (Kapton) 样品的简化模型以及相关的电流密度示意图

Fig. 1. Simplified model of space electron irradiation of polyimide (Kapton) samples and diagram of associated current density.

2.1 空间电子的蒙特卡罗模拟

在单能电子辐照聚合物的同步电子散射/输运模型工作基础上^[28,29], 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 GEO 电子能谱分布的空间多能电子的散射模型. 为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, 其次通过提取已有散射数据库进行电荷输运模拟.

参照 SIRENE 机构的地面模拟实验方法^[30], 本文的空间电子是通过两个单能电子束实现的. 具体而言, 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/输运过程, 空间电子分布符合 GEO 电子能谱的理论公式^[30]. GEO 电子能谱的理论公式常被用来研究空间充电问题^[30]. 本文数值模拟中采用的电子积分能谱分布的理论公式如下:

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

其中 E_B 是空间多能电子的能量; $J(> E_B)$ 为空间电子对应的电子束流密度分布; E_a 和 E_C 为入射空间多能电子 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实现^[31].

2.2 电荷输运与俘获

空间电子辐照聚合物样品后首先与原子发生散射和电离作用, 沉积在样品内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, 形成具有局部等离子体密度区域的电荷分布, 部分高能电子会穿透聚酰亚胺样品. 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、俘获和复合共同作用下的运动就是电荷的输运过程. 俘获过程存在俘获和去俘获两种效应. 空间电子对聚合物的辐照是非聚焦型的, 样品表面横向线方向保持不变, 文中只考虑空间电子辐照聚合物沿样品深度方向的影响. 假设样品内部自由电子浓度 $n(z, t)$ 、俘获电子浓度 $n_{\text{trap}}(z, t)$ 、自由空穴浓度 $h(z, t)$ 、俘获空穴浓度 $h_{\text{trap}}(z, t)$ 、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、泊松方程和俘获方程组成的方程组^[30,32]:

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

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

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

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

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

这里 e 为电子电量 1.6×10^{-19} C; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为样品相对介电常数, 对于聚酰亚胺取 3.45; r 为电子空穴的复合率, 文中默认的数值为 $10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; μ_e 和 μ_h 分别为电子和空穴迁移率; D_e 和 D_h 分别为电子和空穴扩散系数. 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.

俘获能力的大小是通过俘获密度与俘获截面乘积项所代表的俘获概率来决定的, 具体过程通过 (7) 式和 (8) 式说明:

$$\begin{aligned} & \partial(n_{\text{trap}}(z, t)) / \partial t \\ &= n(z, t) \mu_e E(z, t) S_e [N_e - n_{\text{trap}}(z, t)] \\ & \quad - n_{\text{trap}}(z, t) f \exp[-(E_T - \Delta E_{\text{PF}}) / (k_B T)], \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \partial(h_{\text{trap}}(z, t)) / \partial t \\ &= h(z, t) \mu_h E(z, t) S_h [N_h - h_{\text{trap}}(z, t)] \\ & \quad - h_{\text{trap}}(z, t) f \exp[-(E_T - \Delta E_{\text{PF}}) / (k_B T)], \quad (8) \end{aligned}$$

其中 N_e 和 N_h 分别为电子俘获密度和空穴俘获密度, S_e 和 S_h 分别为电子俘获截面和空穴俘获截面.

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

3 数值模拟结果及其分析

空间电子辐照聚合物的充电特性与聚合物材料的电子迁移率、俘获密度、复合率和介电常数等参数有关. 无特殊说明, 我们选取电子迁移率为 $10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[29], 空穴迁移率为 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 复合概率为 $10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 俘获截面为 10^{-11} cm^2 , 俘获密度为 10^{14} cm^{-3} ^[33], 相对介电常数 ε_r 为 3.45^[29], 聚合物样品厚度为 $25 \mu\text{m}$ ^[29] 为默认参数. 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.

3.1 数值模拟结果与实验数据的比较

图 2 所示为数值模拟结果与实验数据的比较^[32]. 其中, 实验中聚酰亚胺样品的厚度为 $25 \mu\text{m}$. 通过数值模拟, 电子迁移率为 $10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 俘获密度为 10^{14} cm^{-3} 时, 数值模拟与实验数据结果相吻合. 文中的空间电子分布主要在 10—400 keV

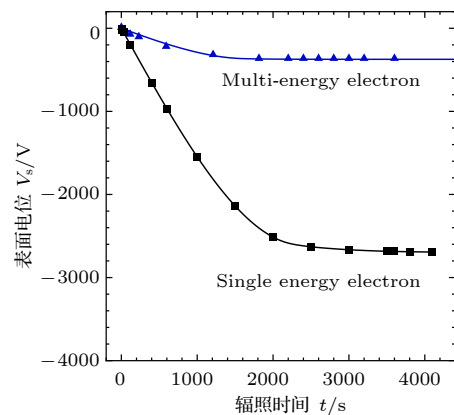


图 2 空间电子辐照聚合物表面电位数值模拟和实验数据的比较^[32]

Fig. 2. Numerical simulation and experimental data comparison of surface potential of space electron irradiation polymer^[32].

之间,二次电子产额小于1,空间电子辐照聚合物形成负充电,内部空间电荷分布总体为负,随着空间电子的辐照样内部沉积的电子数量逐渐增多,图2得到的表面电位逐渐降低.随着空间电子进一步辐照聚合物样品,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样品电流.需要注意的是,聚合物样品的平衡机制会随样品厚度和入射电子能量的不同而有所差异.

3.2 空间电子散射形成的局部等离子体分布

图3给出了电子入射能量为10, 20和30 keV,电子数目为1000个的初始散射电子密度分布图.散射形成的电子空穴分布形态相似.由散射电子密度分布可以看出,能量越高电子密度分布越平缓,峰值位置越靠近样品底部,峰值越小.当入射电子能量较高时,电子在样品中能量损失到零所需的步数变多,运动的距离也会变长.入射电子能量较高时,散射类型更多的是弹性散射,弹性散射不会产生二次电子和空穴,所以电子密度会较低.值得注

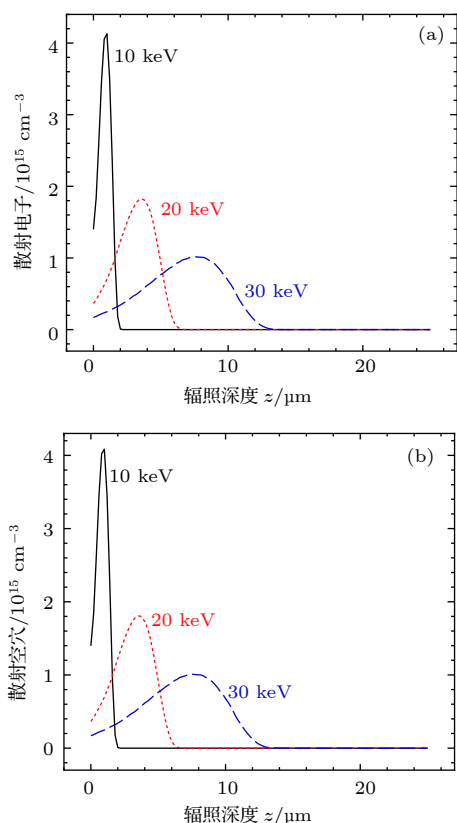


图3 空间电子散射 (a) 散射电子密度分布; (b) 散射空穴密度分布

Fig. 3. Space electron scattering: (a) Scattering electron density distribution; (b) scattering hole density distribution.

意的是,文中选择的入射电子能量均为大于10 keV的电子,样品表面的正电荷分布几乎消失,主要因为发生非弹性散射的位置距离样品表面较远,生成二次电子能量较低而无法运动到样品表面并逸出,所以不会出现正电荷密度分布.

3.3 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.

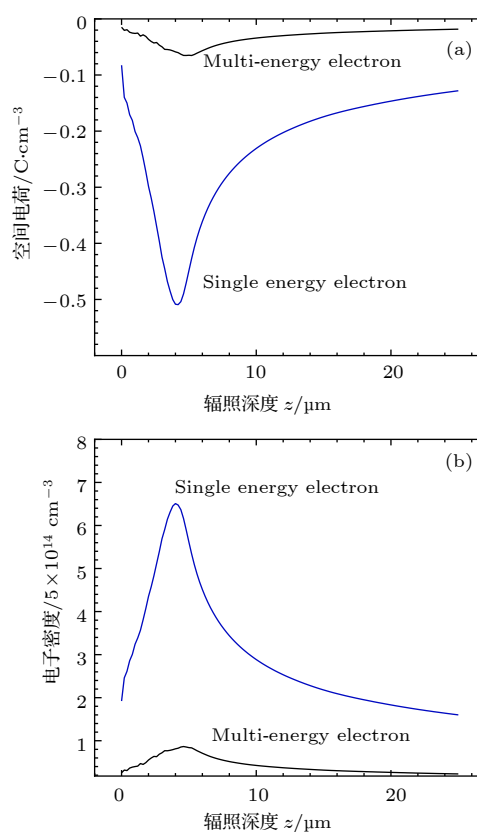


图4 空间电子辐照聚合物空间电荷和电子密度分布 (a) 空间电荷; (b) 电子密度

Fig. 4. Space charge and electron density distribution of irradiated polymers: (a) Space charge; (b) electron density.

图4所示为空间单能电子(20 keV)和空间多能电子(10—400 keV)辐照聚合物在自洽场、浓度梯度、俘获、复合等作用下形成的空间电荷和电子密度分布.不同的入射电子有不同的散射区域,能量越高的入射电子得到的电子密度、空间电荷密度分布越平缓,峰值位置越靠近样品底部,峰值越小.当入射电子大于35 keV时,空间电荷密度峰值位

置在迁移和扩散的作用下, 向样品底部移动几乎超过样品厚度, 峰值位置逐渐消失. 当入射电子能量大于 50 keV 时, 散射射程大于样品厚度 25 μm , 电子散射射程达到样品厚度, 沉积在样品中的电子减少, 所以电子浓度、净电荷密度峰值位置进一步移向样品底部.

单能电子输运过程的穿透样品深度: 25 μm 厚的聚酰亚胺样品, 入射电子能量范围为 20—35 keV 时, 电子散射和运输的结果是非穿透的, 充电特征时间随着入射电子能量的升高而降低. 而对于厚度为 25 μm 的聚酰亚胺样品当电子能量大于 35 keV 时, 散射电子在运输后会穿透整个聚合物样品, 充电特征时间反而随着入射电子能量的升高而增加. 这主要是因为穿透性的入射电子在样品中形成的空间电荷密度范围超越了整个样品深度, 样品中不同位置处电荷密度的梯度变小, 从而表面电位的时变特性比较平缓. 空间多能入射电子能量分布中含有大量的高能电子, 当电子能量大于 35 keV 时, 入射电子会穿透厚度为 25 μm 的聚酰亚胺样品, 所以在相同的辐照时间内, 单能电子辐照聚合物样品的空间电荷积累会大于混合电子辐照聚合物的负空间电荷积累. 所以单能电子辐照得到的空间电荷分布和电子密度分布大于多能电子辐照得到的结果.

如图 5 所示, 空间多能电子能量分布中含有大量的高能电子, 其中电子能量大于 35 keV 时, 大量入射电子会穿透厚度为 25 μm 的聚酰亚胺样品, 样品中不同位置处电荷密度的浓度变小, 表面电位的时变特性比较平缓, 充电暂态时间反而随着入射电子能量的升高而增加, 实际样品中积累的负电荷密度随着能量的升高而减少; 而当电子能量小于 35 keV 时, 大量入射电子会积累在聚合物样品内部, 表面电位的大小随充电暂态时间升高而降低. 所以在相同的辐照时间内, 单能电子辐照聚合物样品的空间电位会大于多能电子辐照聚合物的空间电位. 图 6 为空间多能电子和单能电子辐照聚合物的空间电场分布. 空间多能电子辐照聚合物达到充电平衡态时所需的时间大于单能电子辐照聚合物的时间, 单能电子辐照的电荷积累量大于多能电子辐照的电荷积累量, 所以单能电子辐照得到的空间电场的绝对值大于多能电子辐照得到的电场. 出现这些现象的原因归结为, 空间多能电子中存在大量高能电子能量段, 小于 35 keV 的入射电子能量,

空间电场的大小随充电时间越长电荷强度越大. 但是对于大于 35 keV 的入射电子能量, 由于大量电子穿透聚合物样品, 样品中不同位置处电荷密度的梯度变小, 从而空间电场随充电时间趋于平缓, 因此空间多能电子辐照聚合物样品得到的空间电场强度明显小于单能电子辐照聚合物样品的空间电场强度.

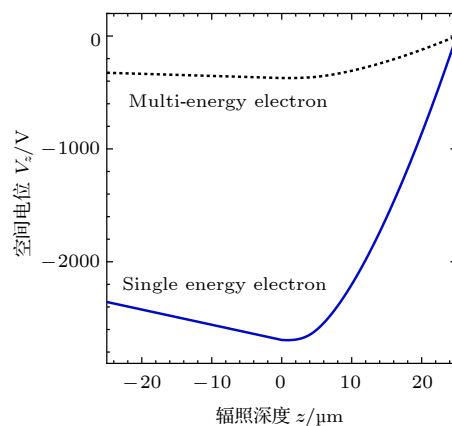


图 5 空间单能电子和多能电子辐照聚合物的空间电位分布

Fig. 5. Spatial potential distribution of polymer irradiated with single and multi-electron energy in space.

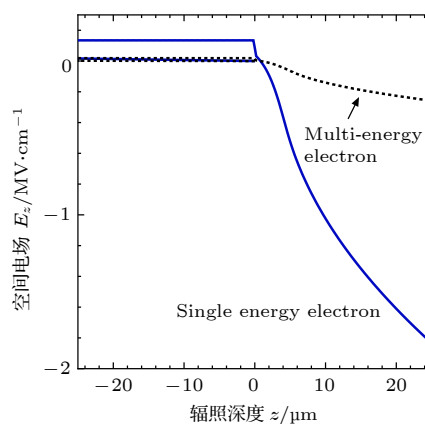


图 6 空间单能电子和多能电子辐照聚合物的空间电场分布

Fig. 6. Distribution of space electric fields of polymer irradiated by space single and multi-electron.

3.4 样品参数条件下的空间电位

空间多能电子辐照聚合物的充电动态过程比较复杂, 充电动态过程既受样品微观参数的影响, 又与空间环境的辐照因素有关. 本节研究空间多能电子辐照聚合物的充电空间电位与微观样品参数和复杂辐照条件之间的关系, 得到不同微观条件下的动态空间电荷分布与微观影响因素的关系式. 本

节的数值模拟参数的取值范围比较大. 电子迁移率 μ_e 的范围是 10^{-9} — 10^{-11} $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 样品厚度范围为 25—50 μm , 复合率的范围为 10^{-14} — 10^{-17} $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 介电常数为 2—9.

如图 7 所示, 空间电位随电子迁移率的减小而降低. 电子迁移速度越小, 聚合物内部暂态充电过程变长, 聚合物内沉积的电子数增多, 负空间电荷量会增大, 负充电强度会增强. 这里, 随着电子迁移率的增加会有更多的电子离开聚合物样品底部, 但是对电位起主要作用的是俘获电子, 因而表面电位的增加并不明显. 对于电子迁移率很低的聚合物, 电子束辐照形成的负充电强度会变得比较大.

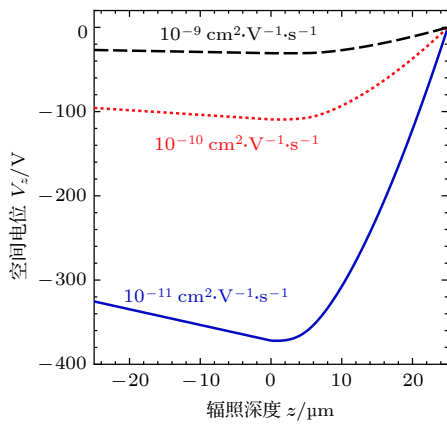


图 7 电子迁移率对应的空间电位

Fig. 7. Spatial potentials corresponding to electron mobility.

图 8 所示为空间多能电子辐照聚合物的样品厚度对应空间电位. 从图 8 中可看出, 随着样品厚度的增加, 空间电位明显降低, 最低点电位的下降更明显, 空间电荷积累随样品厚度的增加的加强.

图 9 给出了空间电位和复合率的关系, 可以看出空间电位随着复合率的增加而增加. 空间电

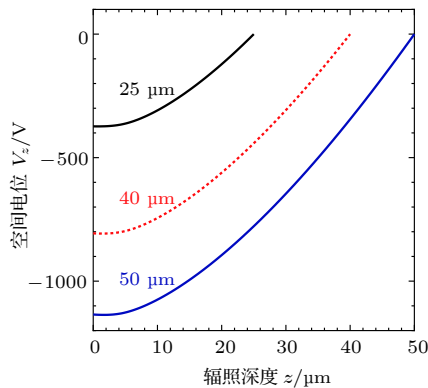


图 8 样品厚度对应的空间电位

Fig. 8. Space potential corresponding to sample thickness.

位分布形态随复合率的变化时, 电子空穴发生复合时会同时消失, 两者复合量相同且与电子和空穴浓度乘积成正比. 当复合概率比较小时, 样品内会有更多的自由电子和空穴, 在电场的作用下这些电子和空穴分别向样品底部和表面运动, 而且空间电位绝对值变大, 从而有更多的电子更快地运动到样品底部形成泄漏电流. 复合概率越大, 样品内部积累的总的负电荷密度越大, 所以空间电位越负.

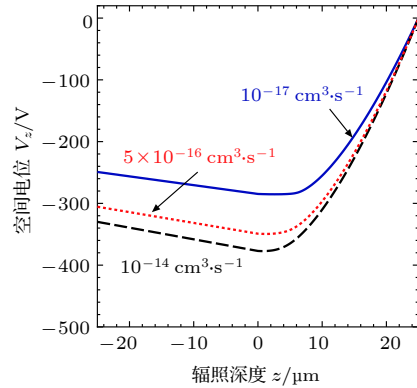


图 9 复合率对应的的空间电位

Fig. 9. Space potential corresponding to the recombination rate.

图 10 给出了介电常数条件下, 空间电位分布形态随介电常数的变化. 相对介电常数越大, 空间电位越大. 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, 导致空间电位的绝对值会降低, 最大场强会降低.

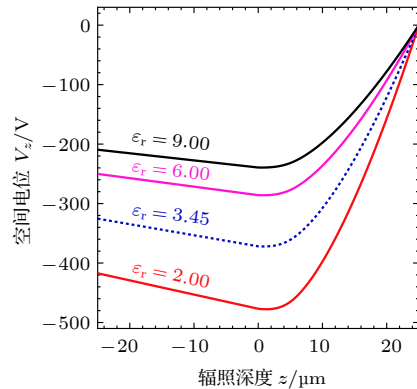


图 10 介电常数对应的空间电位

Fig. 10. Spatial potentials corresponding to dielectric constants.

4 讨论

1) 聚合物内沉积的电子在迁移扩散作用下向等离子体高密度区域外运动, 并逐渐形成样品电

流. 样品电流是负带电过程达到平衡的关键. 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因素, 多能电子辐照聚酰亚胺样品后, 少量部分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. 聚合物样品的电子迁移率越低, 样品越厚, 俘获密度越大, 多能电子辐照聚合物的负空间电荷量和充电强度会越强. 因此多能电子辐照聚合物的充电过程和充电强度是由以上综合因素共同决定的.

2) 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, 所以研究中得到充电强度实际包含此部分的带电量, 造成充电强度比实际的充电强度在数值上有加强. 同时, 多能电子辐照聚合物的研究, 随着大量电子沉积在聚合物样品内部, 在一定程度上, 聚合物的某些材料性能会发生变化, 诸如材料的电导率、电导特性会随着大量电子沉积而变大, 这种特性的变化在几百微米较厚的样品中尤为明显. 关于聚合物带电的温度效应也是后续的研究工作中的重点^[22,24]. 同时空间电子辐照聚合物充电到一定电位会发生放电击穿, 放电阈值电位超过 9.5 kV 左右^[31]. 空间情况下, 单能电子辐照聚合物获得的充电强度高于多能电子辐照获得的充电强度, 所以空间辐照研究仅仅通过单能电子辐照的模式是不完善的, 多能电子辐照模式需要进一步深入研究^[25].

5 结 论

通过同步电子散射/输运模型研究了空间电子辐照聚酰亚胺的充电特性和微观机理, 主要得到以下结果: 首先, 空间电子入射聚合物样品后, 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输运到样品底部得到样品电流. 结果显示, 厚度的影响高于电子迁移率和俘获密度对充电强度的影响, 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重要因素, 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, 空间电子辐照聚合物的充电稳态特性是由样品电流、聚合物样品参数的电子迁移率、样品厚度、俘获密度和电子射程大于样品

厚度的高能电子的作用共同决定的. 本研究工作和结果有助于深入了解空间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类问题的数值分析具有参考价值. 充放电机理研究是近年航天器失效分析的研究热点. 文中建立的空间电子辐照聚合物模型对提高航天器充放电故障机理研究的水平具有重要的科学意义和价值.

参考文献

- [1] Balmain K G 1986 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **21** 427
- [2] Garrett H B, Whittlesey A C 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 2017
- [3] 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]
- [4] 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]
- [5] 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]
- [6] Yuan D L, Min D M, Huang Y, Xie D R, Wang H Y, Yang F, Zhu Z H, Fei X, Li S T 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 097701 (in Chinese) [袁端磊, 闵道敏, 黄印, 谢东日, 王海燕, 杨芳, 朱志豪, 费翔, 李盛涛 2017 物理学报 **66** 097701]
- [7] Wang S, Wu Z C, Tang X J, Sun Y W, Yi Z 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 025201 (in Chinese) [王松, 武占成, 唐小金, 孙永卫, 易忠 2016 物理学报 **65** 025201]
- [8] Liu J, Zhang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 149401 (in Chinese) [刘婧, 张海波 2014 物理学报 **63** 149401]
- [9] Yang W L, Han J S, Wang Y, Lin J Q, He G Q, Sun H G 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 227101 (in Chinese) [杨文龙, 韩浚生, 王宇, 林家齐, 何国强, 孙洪国 2017 物理学报 **66** 227101]
- [10] Hou K, Zhang Z W, Huang Y, Wei J J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 035203 (in Chinese) [侯焜, 张占文, 黄勇, 韦建军 2016 物理学报 **65** 035203]
- [11] Garrett H B, Evans R W, Whittlesey A C, Katz I, Jun I 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2440
- [12] Riffaud J, Griseri V, Berquez L 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 073901
- [13] Koons H, Mazur J, Lopatin A, Pitchford D, Bogorad A, Herschitz R 2006 *J. Spacecr. Rockets* **43** 178
- [14] Czeremuszkina G, Latreche M, Wertheimer M R 2001 *Nucl. Instrum. Meth. B* **185** 88
- [15] Okumura T, Masui H, Toyoda K, Cho M G, Nitta K, Imaizumi M 2009 *J. Spacecr. Rockets* **46** 697
- [16] Toyoda K, Masui H, Muranaka T, Cho M, Urabe T, Miura T, Kawakita S, Gonohe Y, Kikuchi T 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2413
- [17] Davis V A, Mandell M J, Cooke D C, Wheelock A, Matéu-Vélez J C, Roussel J F, Payan D, Cho M, Koga K 2013 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** 3303
- [18] Zhang P 2017 *J. Comput. Theoret. Trans.* **46** 330
- [19] Donegan M M, Sample J L, Dennison J R, Hoffmann R 2010 *J. Spacecr. Rockets* **47** 134
- [20] Liu J, Zhang H B, Ding Y H, Tong J S, Yuan Y, Zhao Q 2019 *Micron* **116** 100
- [21] Liu J, Zhang H B 2014 *Micron* **67** 12
- [22] Sayehi M, Sahnoun R D, Fakhfakh S, Baklouti S 2018 *Ceram. Int.* **44** 5202

- [23] Ammar L B, Fakhfakh S, Jbara O, Rondot S, Hadjadj A 2017 *Micron* **98** 39
- [24] Fakhfakh S, Jbara O, Rondot S, Hadjadj A, Fakhfakh Z 2012 *J. Non-Cryst. Solids* **358** 1157
- [25] 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]
- [26] Li W Q, Zhang H B 2010 *Appl. Surf. Sci.* **256** 3482
- [27] Li W Q, Zhang H B 2010 *Micron* **41** 416
- [28] Sessler G M 1992 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **27** 961
- [29] Sessler G M, Figueiredo M T, Ferreira G F L 2004 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **11** 192
- [30] Miyake H, Tanaka Y 2017 *Sensor. Mater.* **29** 1213
- [31] Hiro S, Tsuji K, Fujii H 1999 *Electr. Eng. Jpn.* **129** 10
- [32] Miyake H, Honjoh M, Maruta S, Tanaka Y, Takada T, Koga K, Matsumoto H, Goka T, Dirassen B, Levy L, Payan D 2007 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* Vancouver, Canada, Oct. 14–17, 2007 p763
- [33] Fitting H J, Touzin M 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044111

Charging characteristics and micromechanism of space electrons irradiated polymers^{*}

Liu Jing^{1)2)†} Zhang Hai-Bo²⁾

1) (School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

2) (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 29 October 2018; revised manuscript received 5 December 2018)

Abstract

The charging characteristics and microscopic mechanism of space electrons irradiated polymers are the basis for the study and protection of spacecraft polymer charging and discharging characteristics. Monte Carlo method is used to simulate the scattering process of space electrons, and the fast secondary electron model simulates the generation of secondary electrons. The finite difference method is used to solve the charge transport process of charge continuity equation, current density equation and Poisson equation. The capture process realizes the transmission process of space electrons through the equation based on the Poole-French effect. Based on the electronic scattering/transport synchronization model and combined with the geostationary earth orbit electronic spectrum distribution theoretical formula of the French National Aeronautics and Space Research Agency (ONERA) and the ground experimental method of the agency (SIRNE), a scattering model based on the electron spectrum distribution in geosynchronous orbit is established. The numerical simulation of the charging process of space electrons irradiated polymers is carried out. The space charge density, space potential, electric field distribution and the space potential of polymer sample under the irradiation of single- and multi-energy electrons in space environment are obtained. The relationship among charging characteristics, microscopic parameters and surface potential of the sample is clarified. The surface potential characteristics of space electrons irradiated polymer are consistent with the experimental results. The single energy charge potential and strength are higher than those of multi-energy electrons. When the charging reaches a steady state, the electron mobility is smaller (less than $10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), and the absolute value of the space potential is significantly enhanced with the decrease of the electron mobility. When the composite rate is large (greater than $10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), the absolute value of the spatial potential increases with recombination rate increasing. The study of the charging characteristics of space electrons is not comprehensive because only the mode of single-energy electron irradiation is taken into consideration. The research results are of great scientific significance and practical value for revealing the charging characteristics and microscopic mechanism of space electrons irradiated polymer and improving the research level of spacecraft charge and discharge fault mechanism.

Keywords: space radiation, polyimide, charging characteristics, numerical simulation

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

DOI: 10.7498/aps.68.20181925

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11805030).

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