电子束辐照诱导介质表面带电演化过程

王丹^{1,2,3}, 蔡亚辉^{1,3}, 茅张松^{1,3}, 贺永宁^{1,3*}

1. 西安交通大学微电子学院, 西安 710049;

2. 西安交通大学信息与通信工程学院, 西安 710049;

3. 西安市微纳电子与系统集成重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn

2021-07-26 收稿, 2021-10-28 修回, 2021-11-01 接受, 2021-11-09 网络版发表

国家自然科学基金(62101425, U1832190)和空间微波技术重点实验室稳定支持基金(2020SSFNKLSMT-01)资助

摘要 空间环境中航天器介质表面的充放电现象是在轨航天器工作中面临的重要可靠性问题, 开展介质表面充放电动态过程研究对于揭示带电机理、开展带电防护研究至关重要. 本文推导了介质表面电子发射行为对表面带电类型和带电水平的影响规律, 通过仿真建模模拟了恒定能量电子束辐照介质时的表面电荷积累过程, 获得了氧化镁、氧化铝、高阻氧化锌3种介质表面电位演化过程的动态规律. 结果表明, 如果电子束能量低于二次电子产额曲线中第二临界能量, 则辐照诱发的表面负带电或正带电的平衡电位较低, 仅为几十伏; 而高于第二临界能量的电子束辐照诱发的表面负带电水平可达上万伏; 具有高第二临界能量的介质材料的负带电水平相对较低且充电速率较为缓慢, 是减缓介质表面充电过程、实现带电防护的理想材料. 本研究详尽论述了单一能量电子束辐照下介质表面电位演化过程的动态规律, 对于进一步开展介质表面带电水平分析和抑制带电研究具有重要意义.

关键词 介质带电, 表面电位, 平衡电位, 二次电子发射, 电子束辐照

空间航天器工作在复杂的等离子体环境中, 并时刻受到空间粒子束流、宇宙射线等辐照的影响, 可能产生表面带电、深层带电、粒子谐振等现象, 进而诱发介质表面击穿、体击穿、谐振放电等多种不良效应^[1,2]. 这些不良效应轻则会劣化部件性能、损伤航天器局部表面, 重则可能引起零部件甚至航天器整体失效^[3~5]. 随着国际航天事业的发展, 空间环境中介质带电及放电诱发的航天器可靠性问题日益突出^[5~7], 开展关于粒子辐照下的航天器介质表面带电研究, 对于提升航天器中介质材料的稳定性、降低空间环境中介质材料发生可靠性问题的风险十分必要.

介质材料在受到粒子束流辐照时, 表面易于产生电荷沉积作用而诱发带电. 介质表面带电水平较高时会产生强电场, 从而可能诱发表面放电、击穿等可靠

性问题. 实际上, 在轨航天器中的介质表面带电现象是制约航天器性能及寿命的重要因素之一^[6,7], 而产生表面带电的根本原因是电子束辐照诱导的材料表面二次电子发射行为. 二次电子发射是指当粒子轰击材料时表面有电子逸出的物理现象. 二次电子产额(secondary electron yield, 记为SEY或 δ)是衡量材料表面二次电子发射水平的重要物理量, 其定义为电子与材料相互作用过程中, 出射电子数量与入射电子数量的比值^[8]. 国际上关于航天器介质表面带电及放电相关的研究始于20世纪70年代, 之后关于航天器介质表面带电理论、充电水平、带电防护、放电阈值等相关研究逐渐兴起. 国内学者在空间介质材料表面充放电研究方面取得了诸多成果, 包括真空环境中介质材料表面的沿面闪络问题^[9~11], 有机介质表面带电的充电原理、放电特性、

引用格式: 王丹, 蔡亚辉, 茅张松, 等. 电子束辐照诱导介质表面带电演化过程. 科学通报, 2022, 67: 212–220

Wang D, Cai Y H, Mao Z S, et al. Evolution of dielectric surface potential induced by electron beam radiation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 212–220, doi: [10.1360/TB-2021-0746](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0746)

带电防护研究^[12-14]，以及空间介质材料的带电评估方法、带电防护关键技术^[15,16]等。目前国内外关于空间介质表面带电理论和带电抑制方法的研究已有一定的进展，但相关研究更关注辐照前后系统稳态的变化情况，而关于电子束辐照下介质表面带电动态过程的研究还不够完善，需要进一步开展。

本文分析了恒定能量电子束辐照介质情形下的表面带电情况，通过计算瞬态表面电势(表面电位)得到了介质表面电位平衡过程曲线和电位变化速率曲线，并提取了3种能量区域内电子束辐照介质表面的稳态电位水平和达到稳态所需要的时间信息，获得了入射电子能量影响表面瞬态电位和稳态电位的理论规律。本文深入分析了不同能量范围内电子束辐照下的介质表面电势演化规律，对开展介质表面带电过程以及抑制带电相关研究具有指导意义。

1 电子束辐照介质表面带电分析

1.1 电子束辐照介质表面诱发的带电稳态分析

图1所示为介质表面不带电时的典型SEY曲线^[1]。设 E_p 为入射电子的初始能量，当 E_p 较低时SEY也较低，而后随 E_p 增加SEY逐渐上升，达到峰值后随 E_p 增加SEY则逐渐降低。对于大多数材料，SEY取得峰值(记为 δ_m)所对应能量(记为 E_{pm})的典型值约为几百eV。该曲线上包含两个使得SEY=1的能量点，其中低能区使得SEY=1的点称为第一临界能量点并记为 E_1 ，高能区使得SEY=1的点称为第二临界能量点并记为 E_2 。

考虑在真空环境中，一束能量恒定的电子束持续辐照介质材料表面的情形，并且忽略材料漏电和被击

图1 (网络版彩色)介质表面不带电情况下的典型SEY曲线^[1]
Figure 1 (Color online) Typical SEY curve of the uncharged dielectric surface^[1]

穿的情况。设 E_{p0} 为入射电子到达介质表面时的碰撞能量， V_f 表示系统达到稳态后的最终电位， E_f 表示系统达到稳态后入射电子的最终碰撞能量， q 为元电荷。下面考虑3种能量恒定的电子束流持续轰击不带电的介质表面时，系统平衡后表面电位 V_f 和电子束最终碰撞能量 E_f 的计算分析过程。(1) 当 $E_1 < E_p < E_2$ 时， $SEY > 1$ ，入射电子少于出射电子，表面积累正电荷，电位增加。但是大多数二次电子的能量仅为几eV，这部分慢电子受到正带电表面吸引无法离开从而聚集在介质表面，使得表面电位降低，最终表面电位稳定在一个能够吸引住部分低能二次电子而使其他二次电子逃逸的水平。此时逃逸电子和入射电子数量相同，系统达到平衡。设最终能够束缚住部分二次电子并使 $SEY=1$ 的正电位为 V_c ，其数值略大于0，此时有 $V_f = V_c$ ， $E_f = E_p + qV_c$ 。(2) 当 $E_p < E_1$ 时， $SEY < 1$ ，入射电子数量多于出射，表面积累电子，初始时刻介质表面电位降低并保持负值；负电位的介质表面会降低入射电子的碰撞能量， E_{p0} 降低后仍然小于 E_1 ，会使更多的电子积聚在表面；当表面电位降低至使 E_{p0} 为0时，系统达到平衡， $V_f = -E_p/q$ ， $E_f = 0$ 。(3) 当 $E_p > E_2$ 时， $SEY < 1$ ，入射电子数量多于出射，表面积累电子，初始时刻表面电位降低并保持负值；随着电子束的持续辐照，表面电位持续降低， E_{p0} 也持续降低直至等于 E_2 ，此时入射电子数量与出射电子数量相等，系统达到平衡，且 $V_f = (E_2 - E_p)/q$ ， $E_f = E_2$ 。

1.2 介质表面电位水平计算方法

当一束能量均匀的电子流轰击某质地均匀且表面平整的介质样品表面时，表面所积累的电荷量和表面电势大小与材料介电常数、入射束流强度、SEY、束斑尺寸、束流作用时间相关。此处设 I_p 为入射束流强度； a 为束斑直径； ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_r 为介质的相对介电常数； t 为束流与样品的作用时间； σ_T 为表面电荷变化量； V_s 为表面电势； ΔV_s 表示表面电势的变化量。经电子束辐照后的介质样品表面电荷的变化量为

$$\sigma_T = -I_p t (1 - \delta). \quad (1)$$

当 $\delta > 1$ 时， σ_T 为正值，表示表面积累正电荷；相反，当 $\delta < 1$ 时， σ_T 为负值，表示表面积累负电荷。此时，在已知表面电荷量的情况下，根据文献^[17]，介质样品表面电势的变化量为

$$\Delta V_s = \frac{1}{\pi(1 + \epsilon_r)\epsilon_0} \frac{\sigma_T}{\Phi}, \quad (2)$$

其中, Φ 为辐照面积, 该参数可用束斑直径表示为

$$\Phi = \pi(a/2)^2. \quad (3)$$

综合式(1)~(3), 可得电子束辐照一次后, 介质表面电势变化量为

$$\Delta V_s = \frac{-4I_p(1-\delta)}{\pi^2 a^2 \epsilon_0 (1+\epsilon_r)}. \quad (4)$$

如果介质表面经过多次辐照, 则最终的表面电位 V_s 即为该过程中所有 ΔV_s 的代数和:

$$V_s = \sum \Delta V_s. \quad (5)$$

1.3 二次电子发射特性曲线拟合

计算介质材料的表面电位需要首先获得材料表面不带电情况下的SEY数值. 在此选取了3种介质材料: 氧化镁、氧化铝及高阻氧化锌. 3种材料的SEY测试曲线如图2所示^[18~20]. 在表面计算过程中需要电子入射能量与SEY数值一一对应, 因此需要对文献^[18~20]中报道的SEY曲线进行公式拟合, 以保证后续仿真计算过程中在任意 E_p 点都能够得到相应的SEY值. 本文使用的SEY拟合公式为Dionne^[21]在1973年报道的SEY半经验理论公式:

$$\delta = \frac{B}{E_a} (An\lambda_0)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{d_m}{\lambda_0} \right)^{\frac{1-n}{n}} \left(1 - e^{-\frac{d_m}{\lambda_0}} \right), \quad (6)$$

其中, B 为逃逸概率系数, E_a 为内二次电子激活能, A 为初始电子吸收常数, λ_0 为内二次电子平均自由程, 这4个参数均为材料本征物理特性参数. n 为拟合使用的幂指数, 无实际的物理意义; e 为自然底数. 设 d_m 为入射电子在材料中的最大透射深度, 其与入射电子的能量 E_p 存在如下关系:

$$d_m = \frac{E_p^n}{An}. \quad (7)$$

通过式(7)的代换, 能够将式(6)中SEY表示成 E_p 的函数, 确定好拟合参数后即可获得任意 E_p 对应的SEY值. 在此使用式(6)拟合得到了宽能量范围内氧化镁、氧化铝、高阻氧化锌3种材料的SEY拟合曲线, 如图2所示. 此外, 通过提取图2中SEY拟合曲线的数值得到了3种材料的 E_1 和 E_2 值, 如表1所示.

为便于计算, 约定后文中仿真计算所使用的辐照源均为脉冲电子束流, 且参数满足以下条件: 束流强度为 1×10^{-9} A, 束斑直径为 1×10^{-8} m, 脉冲宽度为 0.9×10^{-9} s,

图2 (网络版彩色)3种介质材料SEY测试结果^[18~20]及对应的SEY拟合曲线

Figure 2 (Color online) Measured SEY values^[18~20] and corresponding fitted SEY curves of three dielectrics

表1 3种介质材料SEY拟合曲线的特征参数

Table 1 Key parameters for the fitted SEY curves of three dielectrics

材料	E_1 (eV)	E_2 (eV)	E_{pm} (eV)	δ_m
MgO	44	13368	549	6.24
Al ₂ O ₃	42	5549	368	4.28
ZnO	90	3235	379	1.97

脉冲周期为 1×10^{-9} s. 仿真中涉及氧化镁、氧化铝、高阻氧化锌的相对介电常数, 其值分别为9.8、7.2、4. 需要说明, 随辐照脉冲数量增加, 表面电位会越来越接近于平衡电位, 但不会完全相等, 故在此处约定: 当表面电位刚好大于最终平衡电位的99%时, 即认为表面达到平衡电位, 并以此为标准计算表面达到平衡电位时的脉冲数.

2 结果与讨论

2.1 $E_p < E_1$ 时的带电情况分析

当 $E_p < E_1$ (SEY < 1), 介质表面初始积累负电荷, 随着表面负带电水平的增加, 后续初始电子的碰撞能量降低, 表面负电位水平持续升高, 直至达到能够将入射电子碰撞能量 E_{p0} 减速为0的某一定值. 这里使用初始电子能量 E_p 为40 eV的脉冲电子束对介质进行辐照, 辐照过程中3种材料的表面负带电过程以及表面电位变化速率如图3所示. 图3的计算结果表明, 上述辐照条件下, 随脉冲数量增加, 3种介质的表面电位先急剧下降, 大约经过6个脉冲后, 高阻氧化锌表面电位下降速率逐渐

变缓,大约经过32个脉冲辐照后,氧化镁和氧化铝表面电位下降速率逐渐变缓。

表2给出了 $E_p=40$ eV时3种介质表面达到平衡时的电位水平、达到平衡电位所经历的脉冲数量以及达到平衡时的表面电荷量。对比表2中数据可知,平衡时3种材料的表面电位均为 -40 V,但是达到平衡所需要经历的时间并不一样。其中,高阻氧化锌的电位平衡过程最快,需要经历316个脉冲周期,氧化镁达到平衡电位需要的时间最长,为707个脉冲周期,不同材料电位平衡时的电荷量也与平衡的脉冲数呈现正相关性。结合图3中的电位演化水平曲线可知,初始时刻,在相同的辐照条件下,经过同数量的脉冲辐照后,高阻氧化锌的带电速率高且负带电水平高,而氧化镁的带电速率低且负带电水平略低。

2.2 $E_p>E_2$ 时的带电情况分析

当 $E_p>E_2$ 时($SEY<1$),介质表面初始积累负电荷,随着负电荷在表面积累,后续入射电子的碰撞能量 E_{p0} 降低,且表面负电位水平持续升高,直至达到使入射与出射电子数量相平衡的某一定值。根据图1的SEY曲线,

此时 E_2 是距离 E_p 最近的使 $SEY=1$ 的能量点,因此这种情况下 E_{p0} 最终稳定在 E_2 ,电位最终稳定在使 E_{p0} 降低至 E_2 的某一个负电位,该负电位水平在数值上等于 E_p 与 E_2 的差值除以电子电荷量 q 。图4给出了辐照电子束能量为20000 eV时的介质表面电位变化过程,以及该辐照情形下的表面电位变化速率。由图4可知,3种介质表面电位水平以及电位变化速率均有较大差异,氧化镁表面带电平衡过程较慢,且达到平衡电位时的负带电水平最低;氧化铝和高阻氧化锌表面的带电平衡过程较快,且平衡时的表面带电水平相对较高。

表2给出了 E_p 为20000 eV时3种介质表面达到平衡电位所需要的脉冲数量、平衡电位水平以及平衡电荷量。数据显示,氧化镁表面达到平衡电位需要34180个脉冲周期,而氧化铝和高阻氧化锌达到平衡电位所需脉冲数量均小于氧化镁平衡脉冲数的一半。结合图4中的表面电位变化率可知,氧化镁表面充电过程较慢。综合图4和表2的数据可得:当电子束以高于 E_2 的能量辐照介质时,高 E_2 值的氧化镁具有更低的充电水平,且充电过程更慢,这说明具有高 E_2 值的介质材料更有利于减缓介质表面的带电速率,以及降低介质表面的负带

图3 (网络版彩色) $E_p=40$ eV时介质表面电位 V_s 演化过程(a)及表面电位变化率 ΔV_s (b)

Figure 3 (Color online) Evolution process of surface potential V_s at $E_p=40$ eV (a) and corresponding variation rate ΔV_s (b)

表2 E_p 为40、20000、379 eV时,3种介质的平衡电位、平衡脉冲数量及平衡电荷量

Table 2 Balanced potential, pulse counting and charge quantity of three dielectrics when E_p equals 40, 20000 and 379 eV

材料	平衡电位(V)			平衡脉冲数(个)			平衡电荷量(C)		
	40 eV	20000 eV	379 eV	40 eV	20000 eV	379 eV	40 eV	20000 eV	379 eV
MgO	-40	-6572.22	30.35	707	34180	77	-1.89×10^{-5}	-3.11×10^{-3}	1.44×10^{-5}
Al_2O_3	-40	-14450.99	17.90	540	17057	35	-1.44×10^{-5}	-5.19×10^{-3}	6.43×10^{-6}
ZnO	-40	-16765.21	6.67	316	11699	8	-8.77×10^{-6}	-5.67×10^{-3}	1.46×10^{-6}

电水平. 在实际的电子辐照环境中, $E_p > E_2$ 时产生的表面高水平负带电行为是诱发介质表面击穿放电的重要原因之一^[1].

2.3 $E_2 > E_p > E_1$ 时的带电情况分析

对于 $SEY > 1$ 的 E_p 能量区域, 初始电子诱发二次电子出射使样品表面带正电. 在该正带电表面的作用下, 小于特定能量的二次电子由于受到电场力的作用不会离开表面, 被吸引回的二次电子使介质表面正电势有所降低; 当下一束电子到达样品表面时, 受前置电子束诱导的正带电表面影响, E_{p0} 会有所增加, 如果该碰撞能量下 SEY 仍大于 1, 则本次碰撞后, 表面电势会在前一次正电势的基础上有所增加. 如此往复, 直至表面电位

稳定在某个低水平的正电势, 此时受表面正带电影响, 能够逃逸的电子数量与入射电子数量相同(即经过表面电位修正后, 该能量下的 $SEY = 1$), 系统达到稳定状态. 这种辐照情况下, 由于部分出射电子会被吸引回表面, 因此要得知出射电子的能量分布情况, 才能够准确计算不同电位下能够被吸引回表面的电子数量. 图 5(a) 为 $E_p = 1000$ eV 时氧化镁表面出射二次电子的能量分布情况^[22]. 该能谱曲线表明, 表面出射的大部分二次电子为慢电子, 其能量仅为几至几十 eV. 如果此时表面带十几伏的正电, 则相当数量的电子都不能够逃逸离开表面. 在确定二次电子能量分布的情况下, 能够通过计算表面电势水平得到被吸引回表面的二次电子产额比例, 进而计算得到平衡时的表面正带电水平.

图 4 (网络版彩色) $E_p = 20000$ eV 时介质表面电位 V_s 演化过程(a)及表面电位变化率 ΔV_s (b)

Figure 4 (Color online) Evolution process of surface potential V_s at $E_p = 20000$ eV (a) and corresponding variation rate ΔV_s (b)

图 5 (网络版彩色) $E_p = 1000$ eV 时氧化镁表面逃逸二次电子的能量分布^[22] (a), 以及表面电势 V_s 与有效 SEY 占原始 SEY 比例参数 P 的关系(b)

Figure 5 (Color online) Energy distribution of the secondary electrons escaped from MgO surface at $E_p = 1000$ eV^[22] (a), and the relationship between V_s (surface potential) and parameter P (effective SEY divides original SEY) (b)

在此将能够摆脱表面正电势束缚的二次电子产额称为有效SEY, 并定义参数 P 为有效SEY与原始SEY的比值, 其物理含义为: 最终能够摆脱表面正电势束缚的二次电子数量占不带电情况下所出射二次电子数量的比例. 通过对图5(a)所示 $E_p=1000$ eV时的氧化镁二次电子能量分布图中不同能量区域的电子数量进行叠加, 再除以原始SEY, 最终得到参数 P 关于表面正电势水平 V_s 的关系, 如图5(b)所示. 图5(b)旨在说明以下现象: 当介质表面不带电时, 所有二次电子都能逃逸; 当介质表面正电势水平较低时(例如小于5 V), 能够逃逸的二次电子比例仍然较大; 随表面正带电水平增加, 能够逃逸的二次电子比例逐渐降低; 当表面正电势达到一定水平时(例如大于40 V), 大部分二次电子都会被吸引回样品表面, 此时能逃逸的二次电子比例仅为约24%. 同时, 图5(b)给出了对该 V_s - P 曲线拟合的结果, 拟合公式如式(8)所示, V_s 的单位取V, E_p 的单位取eV:

$$P = \begin{cases} 1, & V_s \leq 2.7, \\ \cos\left(\frac{\pi(V_s-2.7)}{19}\right), & 2.7 < V_s \leq 7, \\ 1.2\exp\left(-\frac{V_s}{9}\right) + 0.2, & 7 < V_s \leq 20, \\ \frac{3.4}{V_s} + 0.16, & 20 < V_s \leq 200, \\ 0.15\cos\left(\frac{V_s}{600}\right) + 0.03, & 200 < V_s \leq 900, \\ \frac{\cos\left(\frac{\pi(V_s-E_p)}{12(E_p-900)} + \frac{\pi}{4}\right) - 0.69}{3.85}, & V_s > 900. \end{cases} \quad (8)$$

此处进行拟合的意义为: 实现仿真计算过程中, 在任意一个 V_s 点都能够计算得到对应的 P 值, 从而能够得到任意表面电势作用下的有效SEY, 以及某个脉冲后介质表面最终的正带电水平. 值得说明的是, 对于不同的 E_p 值, 二次电子能量分布也会略有差异, 因此不同 E_p 值对应的参数 P 拟合公式会略有差异.

本节选取了较为典型的入射能量点, 即 $E_p=379$ eV, 此时氧化锌和氧化铝的SEY接近峰值 δ_m , 氧化镁的SEY略小于峰值. 式(9)给出了 $E_p=379$ eV情况下 $V_s > 20$ V时参数 P 的拟合公式($V_s < 20$ V时的计算公式同式(8)):

$$P = \begin{cases} \frac{6}{V_s} + 0.03, & 20 < V_s \leq 200, \\ \frac{10.239\cos\left(\frac{\pi(V_s-200)}{716}\right) - 7.239}{50}, & V_s > 200. \end{cases} \quad (9)$$

图6给出了3种介质表面的电势平衡过程, 表2给出了 $E_p=379$ eV辐照条件下的平衡电位水平、达到平衡电位经历的脉冲个数以及平衡电荷量的数值. 计算结果表明, 该种辐照条件下的介质表面正带电水平较低, 最多为几十伏, 其中氧化镁的平衡电位最高, 为30.35 V, 平衡时间为77个脉冲周期; 氧化铝次之; 高阻氧化锌的平衡电位最低, 为6.67 V, 平衡所需的脉冲周期仅为8个. 该现象说明, 在能够诱发介质表面带正电的初始电子能量范围内, 具有高SEY特性材料的带电平衡时间长, 平衡电位高; 相反, SEY较低的材料达到平衡电位所需的时间短, 且平衡电位低. 在这种辐照情

图6 (网络版彩色) $E_p=379$ eV时介质表面电位 V_s 演化过程(a)及表面电位变化率 ΔV_s (b)

Figure 6 (Color online) Evolution process of surface potential V_s at $E_p=379$ eV (a) and corresponding variation rate ΔV_s (b)

形下, SEY的小幅降低能引起平衡电位的大幅降低, 并且达到平衡电位的脉冲时间也会大幅缩减. 通过以上分析可知, 当 E_p 介于 E_1 和 E_2 之间时, 电子束辐照会诱发介质表面低水平的正带电, 约为几十伏. 在实际的辐照环境中, 这种低水平的正带电对入射电子碰撞能量的影响很小, 也不会诱发介质表面放电或击穿现象的发生.

3 结论

本文以航天器介质表面带电为研究背景, 通过理论计算展示了恒定能量脉冲电子束辐照下介质表面带电的动态过程, 量化研究了氧化镁、氧化铝、高阻氧化锌3种介质材料二次电子发射特性与其表面带电种

类、带电水平、带电平衡时间及平衡时表面电荷量的关系, 阐明了电子束辐照能量对介质表面瞬态电位和稳态电位的影响规律. 通过理论研究得出了以下结论: (1) 介质SEY曲线上的临界能量点 E_1 和 E_2 是决定其表面充电类型的关键因素, 当 E_p 小于 E_1 或大于 E_2 时介质表面充负电; 当 E_p 位于 E_1 和 E_2 之间时介质表面充正电. (2) $E_p < E_2$ 时, 介质表面不论充正电或负电, 充电电位最高仅为几十伏, 这种低水平的带电通常不足以诱发表面放电. (3) $E_p > E_2$ 时, 介质表面可充电至几千甚至上万伏, 这种高水平的充电行为极易诱发表面放电. (4) 拥有较高 E_2 值的介质材料具有充电水平低且充电速率慢的特点, 可将这类材料作为表面充放电敏感区域的镀层材料以抑制介质表面带电.

参考文献

- Lai S T. Fundamentals of Spacecraft Charging: Spacecraft Interactions with Space Plasmas. Princeton: Princeton University Press, 2011. 2–9
- Li S T, Li G C. Dielectric charging research status and prospect (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 990–1003 [李盛涛, 李国倡. 空间介质充放电研究现状及展望. 科学通报, 2017, 62: 990–1003]
- Lai S T. An overview of electron and ion beam effects in charging and discharging to spacecraft. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1989, 36: 2027–2032
- Gupta S B, Kalaria K R, Vaghela N P, et al. An overview of spacecraft charging research in India: Spacecraft plasma interaction experiments—SPIX-II. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 1072–1077
- Tafazoli M. A study of on-orbit spacecraft failures. *Acta Astronaut*, 2009, 64: 195–205
- Liang B, Xu W F, Li C, et al. The status and prospect of orbital servicing in the geostationary orbit (in Chinese). *J Astronaut*, 2010, 31: 1–13 [梁斌, 徐文福, 李成, 等. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势. 宇航学报, 2010, 31: 1–13]
- Koons H C, Mazur J E, Selesnick R S, et al. The impacts of the space environment on space systems. In: Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Conference. 2000, 7–11
- Seiler H. Secondary electron emission in the scanning electron microscope. *J Appl Phys*, 1983, 54: R1–R18
- Zhang G J, Zhao W B, Zheng N, et al. Research progress on surface flashover phenomena across solid insulation in vacuum (in Chinese). *High Volt Eng*, 2007, 33: 30–35 [张冠军, 赵文彬, 郑楠, 等. 真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展. 高电压技术, 2007, 33: 30–35]
- He L, Li S T, Zhang T. Surface flashover performance of $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ insulation system in vacuum (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2012, 46: 93–99 [何良, 李盛涛, 张拓. $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 绝缘结构的真空沿面闪络特性. 西安交通大学学报, 2012, 46: 93–99]
- Xue J, Wang H, Chen J, et al. Effects of surface roughness on surface charge accumulation characteristics and surface flashover performance of alumina-filled epoxy resin spacers. *J Appl Phys*, 2018, 124: 083302
- Li S T, Li G C, Min D M, et al. Influence of radiation electron energy on deep dielectric charging characteristics of low density polyethylene (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 059401 [李盛涛, 李国倡, 闵道敏, 等. 入射电子能量对低密度聚乙烯深层充电特性的影响. 物理学报, 2013, 62: 059401]
- Min D, Cho M, Khan A R, et al. Charge transport properties of dielectrics revealed by isothermal surface potential decay. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2012, 19: 1465–1473
- Li G, Li S, Pan S, et al. Dynamic charge transport characteristics in polyimide surface and surface layer under low-energy electron radiation. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2016, 23: 2393–2403
- Yuan Q Y, Su Q S, Meng Z C, et al. Surface charging characteristics of kapton under the electron irradiation (in Chinese). *Equip Environ Eng*, 2017, 14: 1–4 [原青云, 苏泉圣, 蒙志成, 等. 电子辐照下聚酰亚胺材料表面充电特性研究. 装备环境工程, 2017, 14: 1–4]
- Wang L, Qin X G. Researches on the evaluating test methods of space material's surface charging/discharging characteristics (in Chinese). *Vac Cryog*, 2002, 8: 83–87 [王立, 秦晓刚. 空间材料表面充放电性能试验评估方法研究. 真空与低温, 2002, 8: 83–87]
- Zarbout K, Ahmed A S, Moya G, et al. Stability of trapped charges in sapphires and alumina ceramics: Evaluation by secondary electron emission. *J Appl Phys*, 2008, 103: 054107

- 18 Guo J, Wang D, Wen K, et al. Theoretical and experimental investigation of secondary electron emission characteristics of MgO coating produced by atomic layer deposition. [Ceram Int](#), 2020, 46: 8352–8357
- 19 Guo J, Wang D, Xu Y, et al. Secondary electron emission characteristics of Al₂O₃ coatings prepared by atomic layer deposition. [AIP Adv](#), 2019, 9: 095303
- 20 Zhu X, Guo J, Cao W, et al. Theoretical and experimental investigation of secondary electron emission characteristics of ALD-ZnO conductive films. [J Appl Phys](#), 2020, 128: 065102
- 21 Dionne G F. Effects of secondary electron scattering on secondary emission yield curves. [J Appl Phys](#), 1973, 44: 5361–5364
- 22 Zhu X, Guo J, Li X, et al. Evolvement investigation of secondary electron emission for ultrathin MgO coatings prepared by atomic layer deposition. [Appl Sci](#), 2021, 11: 4801

Summary for “电子束辐照诱导介质表面带电演化过程”

Evolution of dielectric surface potential induced by electron beam radiation

Dan Wang^{1,2,3}, Yahui Cai^{1,3}, Zhangsong Mao^{1,3} & Yongning He^{1,3*}¹ School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;² School of Information and Communications Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;³ Key Lab of Micro-nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an 710049, China* Corresponding author, E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn

Spacecrafts operate in a complex space plasma environment and are constantly exposed to cosmic ray radiation. The charging and discharging phenomena that occur on the dielectric surfaces result in major reliability issues for the spacecraft's normal operation. Secondary electron emission (SEE) caused due to electron radiation is the primary inducement of dielectric surface charging, and the SEE level severely affects the charging and discharging status. In this paper, to discover the dynamic evolution process of dielectric surface charging under the circumstances of electron beam irradiation, we have conducted a systematic study on the surface potential and SEE behaviors under various irradiation situations. First, we fitted the secondary electron yield (SEY) curves for three dielectric materials with high resistance, namely MgO, Al₂O₃, and ZnO, and extracted the two critical energies (E_1 and E_2 , where the SEY value equals 1 for the first and second time, respectively), SEY peak values, and the corresponding primary electron energy of the SEY peak value from the three SEY curves. Then, for the situation of electron beam radiating dielectric materials, we developed a physical model and simulated the dynamic evolution processes of the dielectric surface potential. The radiation source is a pulsed electron beam, and some radiating conditions include the following: The intensity of the beam current is set as 1×10^{-9} A, the diameter of the electron beam spot is 1×10^{-8} m, the width of a single pulse is 0.9×10^{-9} s, and the period duration of a single pulse is 1×10^{-9} s. We calculated the charge accumulating amount after pulse radiation and the corresponding variation quantity of the surface potential based on these assumed radiation parameters and the ideal charging situation without charge leakage. We discovered the evolution regularities of the potential variation rate, potential level, and potential balanced duration for the three irradiated materials by calculating the transient surface potential. Furthermore, we have simulated the dependence of surface potential on the radiation energy (E_p) of the electron beam. Several conclusions are summarized by analyzing the simulation and calculation results. First, the SEE characteristics of dielectric materials, particularly the two critical energy values E_1 and E_2 , are the two key factors that affect positive or negative charging, as well as the balanced duration and balanced surface potential level. Second, the negative balanced surface potential induced by low energy electrons ($E_p > E_2$) is only a few tens of volts; the balanced time is a few hundred pulses, and the surface potential variation rate first increases and then decreases. Third, the negative balanced surface potential induced by the high energy electrons ($E_p > E_2$) is relatively high and its magnitude can reach 10000 V; moreover, the balanced duration is relatively long (about several tens of thousands pulse duration). Fourth, because the positive balanced surface potential induced by the middle energy electrons ($E_1 < E_p < E_2$) is extremely low, and the balanced time is short (less than a few tens of seconds), the variation rate of the positive surface potential rapidly decreases. Fifth, the dielectric material with a higher E_2 value exhibits a lower negative balanced surface potential and a long balanced duration, and this property makes the dielectric material with a high E_2 value play a more significant role in the suppression of surface charging. In this paper, we have discussed in detail the dynamic evolution regularities of surface potential when the dielectric is irradiated by an electron beam, which is beneficial for further analysis about dielectric surface charging, discharging, and further research on the charging defense.

dielectric charge, surface potential, balanced potential, secondary electron emission, electron beam radiationdoi: [10.1360/TB-2021-0746](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0746)