

表面功能化

PTFE-SiO₂ 复合涂层电子发射特性及抑制放电

蔡亚辉^{a,b}, 王丹^{a,b}, 张雯^c, 贺永宁^{a,b}

(西安交通大学 a.电子与信息学部微电子学院
b.西安市微纳电子与系统集成重点实验室 c.理学院, 西安 710049)

摘要: **目的** 调控空间电子器件有机介质聚四氟乙烯 (PTFE) 表面的二次电子发射系数 (SEY) 接近 1, 以降低表面电荷沉积速率, 减少静电放电 (ESD) 的发生。**方法** 通过磁力搅拌将 PTFE 分散液和 SiO₂ 粉末混合均匀, 制备不同浓度配比的 PTFE-SiO₂ 混合溶液, 将混合溶液旋涂在覆铜板表面, 在 80 °C 烘箱中加热 4 h 得到复合涂层。利用扫描电子显微镜 (SEM) 对涂层表面形貌进行观察, 采用局域漏电流法对复合涂层的二次电子发射系数进行测试, 通过 MATLAB 对表面电势进行仿真计算, 在 SEM 中对复合涂层放电特性进行测试。**结果** 从 SEM 图可以看出, 随着 SiO₂ 浓度的增大, 复合涂层表面 SiO₂ 颗粒变得密集。从 SEY 测试结果可以看出, 在 SEY>1 的能量区间内, 复合涂层的 SEY 随 SiO₂ 浓度的增大而逐渐降低, 当 SiO₂ 质量分数大于 15% 后, 涂层的 SEY 基本保持不变; 在 SEY<1 的能量区间内, 当 SiO₂ 浓度为 15% 时, 复合涂层的 SEY 达到最大值。表面电势仿真计算结果及放电测试结果显示, 复合涂层能有效降低表面电荷沉积速率及增大放电阈值。**结论** 当 SiO₂ 颗粒质量分数为 15% 时, 复合涂层 SEY 的调控效果最显著, SEY 最大值从 2.0 变化到 1.6, 10 keV 能量下的 SEY 从 0.6 变化到 0.8。当 SiO₂ 颗粒质量分数大于 15% 时, 复合涂层能有效降低真空器件 PTFE 表面电荷沉积速率, 提高放电阈值, 减少静电放电的发生。因此, 这是一种有效提高航天器电子器件可靠性和工作时间的表面处理方法。

关键词: 空间电子器件; 静电放电; SiO₂; PTFE; 复合涂层; 二次电子发射系数

中图分类号: O462.2; V261.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)06-0369-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.06.033

Electron Emission Characteristics and Discharge Suppression of PTFE-SiO₂ Composite Coating

CAI Ya-hui^{a,b}, WANG Dan^{a,b}, ZHANG Wen^c, HE Yong-ning^{a,b}

(a. School of Microelectronics, Faculty of Electronic and Information Engineering, b. The Key Lab of Micro-nano Electronics and System Integration of Xi'an City, c. School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: Polytetrafluoroethylene (PTFE) is widely used in spacecraft, but charge accumulation occurs when PTFE is

收稿日期: 2022-04-23; 修订日期: 2022-10-25

Received: 2022-04-23; Revised: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金 (62101425)

Fund: National Natural Science Foundation of China (62101425)

作者简介: 蔡亚辉 (1995—), 男, 博士生, 主要研究方向为电子发射和显微分析。

Biography: CAI Ya-hui (1995-), Male, Doctoral candidate, Research focus: electron emission and microscopic analysis.

通讯作者: 贺永宁 (1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为宽禁带半导体和表面工程。

Corresponding author: HE Yong-ning (1971-), Female, Doctor, Professor, Research focus: wide bandgap semiconductor and surface engineering.

引文格式: 蔡亚辉, 王丹, 张雯, 等. PTFE-SiO₂ 复合涂层电子发射特性及抑制放电[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 369-376.

CAI Ya-hui, WANG Dan, ZHANG Wen, et al. Electron Emission Characteristics and Discharge Suppression of PTFE-SiO₂ Composite Coating[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 369-376.

irradiated by plasma because of its poor electrical conductivity, which is harmful to the device. To reduce the rate of surface charge accumulation and the occurrence of electrostatic discharge (ESD), in this paper, PTFE-SiO₂ composite coatings were prepared by magnetic stirring, regulating the secondary electron yield (SEY) of PTFE close to 1 over a wide energy range. The PTFE dispersion and SiO₂ powder were mixed by magnetic stirring, and the mixed solutions were spin-coated on the copper-clad plate, which was used to simulate a space electronics device environment. Then the composite coatings were obtained by heating at 80 °C for 4 h, and their morphologies were studied with a scanning electron microscopy (SEM). Their secondary electron emission (SEY) properties were measured through the local leakage current method in the SEM. The surface potential was calculated by MATLAB and the discharge characteristics were tested in the SEM. The morphology of composite coatings showed that the surface roughness increased with the increase of SiO₂ concentration, and the SiO₂ particles were only partially exposed at low concentration. As the SiO₂ concentration increased, the SiO₂ particles changed from the tilt to the horizontality and then covered the PTFE. At the energy where SEY was greater than 1, the shading effect of SiO₂ particles made the SEY of the composite coating decrease with the increase of SiO₂ concentration when the concentration of SiO₂ was less than 15%. When the concentration of SiO₂ was greater than 15%, the shading effect was weakened due to the decrease of the tilt angle, which made the SEY no longer change with the concentration. At the energy where SEY was less than 1, the high SEY property of SiO₂ made the SEY of the composite coating increase with the increase of SiO₂ concentration when the SiO₂ concentration was less than 15%. When the concentration of SiO₂ was greater than 15%, the SEY decreased with the increase of concentration due to the decrease of the tilt angle and the shading effect, and finally tended to be the intrinsic SYE of flat SiO₂. The calculation results of surface potential showed that the balance potential of negative charge was much larger than that of the positive charge, and was approximately equal to the difference between the incident electron energy and E_{p2} . When the SiO₂ concentration was 15%, the equilibrium potential and the charge accumulation rate were the lowest, which were correlated with the maximum values of σ_{10} and E_{p2} . The test of discharge showed that the composite coating could effectively reduce the surface charge deposition rate and increase the discharge threshold. In conclusion, the composite coating can regulate the SEY of PTFE close to 1 over a wide energy range and increase the E_{p2} of PTFE coating. The high SEY property of SiO₂ and the shading effect play a major role in modulating the SEY. The modulation effect of SEY is the most obvious when the concentration of SiO₂ is 15%. The maximum SEY value changes from 2.0 to 1.6, and the SEY at 10 keV changes from 0.6 to 0.8. The composite coating can effectively improve the discharge threshold, and reduce the charge accumulation rate and the occurrence of ESD. Therefore, it is a very processing way to improve the reliability and service time of spacecraft electronic devices.

KEY WORDS: space electronics; electrostatic discharge; SiO₂; PTFE; composite coating; secondary electron yield

航天器在运行过程中时刻与周围等离子体环境产生相互作用,由此产生的电子发射对空间电子器件性能具有较大影响。对于介质材料来说,其导电性较差,在电子束轰击后,电荷会沉积在介质材料表面,由此带来的静电放电(ESD)现象对器件危害巨大,其产生的瞬间放电脉冲会对器件造成无法修复的损伤^[1-3]。目前,针对介质产生ESD的抑制方法主要有2种:一种是主动防护,采用粒子发射装置,通过喷射带电粒子来降低带电电位^[4-6];另一种是被动防护,主要通过结构设计、材料选择、接地设计和屏蔽等实现^[6-8]。

空间电子器件中常用的介质材料主要包括氧化物陶瓷材料和有机聚合物材料,其电子发射特性参数如表1所示^[9-19]。其中,聚酰亚胺(PI)和聚四氟乙烯(PTFE)在航天应用中产生的ESD是威胁航天器安全的重要因素之一,相关的带电现象也受到广泛关注和研究^[20-22]。目前,针对有机介质材料产生ESD的被动防护主要集中在结构设计和复合材料制备方

面^[8,23-25],通过对有机介质材料二次电子发射(SEE)特性进行调控来抑制ESD的研究鲜有报道。当介质表面受到电子束轰击时会在表面产生电荷沉积,电荷沉积水平本质上与其二次电子发射系数(SEY)相关^[26]。若 $SEY > 1$,则会在表面沉积正电荷;若 $SEY < 1$,则会沉积负电荷。电荷沉积达到稳定的过程中,表面电势和二次电子发射相互影响,其中电子发射特性参数对电荷沉积速率和电势平衡水平起着重要的影响作用^[27-28]。在 $SEY > 1$ 的能量区间内,SEY越大,则电荷沉积速率越快;在 $SEY < 1$ 的能量区间内,SEY越小,则电荷沉积速率越快。平衡电势与高能下 $SEY = 1$ 的能量值(E_{p2})相关, E_{p2} 越大,则平衡电势越低^[28]。因此,对于有机介质材料,想要通过调控SEE特性来抑制ESD的发生,则需要在低能段($SEY > 1$)通过增大粗糙度来降低SEY,而在高能段则需要选择高SEY和高 E_{p2} 的介质材料制备复合涂层。氧化物陶瓷介质材料的高SEY和高 E_{p2} 特性使得其成为一个不错的选择,但是其低能段的高SEY也

给低能段降低 SEY 的目标带来挑战。而其中 SiO₂ 的高 E_{p2} 及其相对 PTFE 不算太高的 SEY 最大值 (σ_{\max}) 使得这种调控更容易实现, 因此选择 SiO₂ 作为复合涂层中的氧化物陶瓷介质材料。

表 1 常用介质材料的电子发射特性参数

Tab.1 Electron emission characteristics parameters of commonly used dielectric materials

| Materials | σ_{\max} | E_{p2}/keV |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|
| SiO ₂ ^[9-11] | 4-4.5 | 5-6 |
| MgO ^[12-14] | 6-10 | >11 |
| PTFE ^[15-18] | 1.5-3 | 1.5-3 |
| PI ^[17-19] | 1-2 | 0.5-1 |

针对有机物绝缘体在航天器使用过程中所带来的静电放电问题, 文中通过制备 PTFE 和 SiO₂ 颗粒的复合涂层, 研究不同组分对复合涂层二次电子发射特性的影响, 对复合涂层二次电子发射调控机理进行分析, 最后利用 SEM 中的电子束辐照环境探究复合涂层对静电放电的防护作用, 为航天器及其部件静电放电的被动防护提供了一种新途径。

1 试验

1.1 复合涂层样品制备

质量浓度为 60% 的 PTFE 分散液购于江苏艾康生物医药有限公司, 微米级 SiO₂ 粉末购于中国科学院上海硅酸盐研究所, 覆铜板购于泰州博泰电子有限公司。覆铜板前处理工艺: 50 °C 丙酮中超声 5 min→50 °C 乙醇中超声 5 min→50 °C 纯水中超声 5 min→氮气吹干→在烘箱中 50 °C 加热 10 min 烘干。PTFE-SiO₂ 复合涂层采用溶液混合旋涂法制备^[29], 制备流程主要包括: 磁力搅拌 30 min, 将 PTFE 分散液、纯水和 SiO₂ 颗粒混合均匀→用匀胶机在 4 000 r/min 转速下旋涂 1 min, 将混合溶液旋涂在清洗干净的导电覆铜板表面→在 80 °C 烘箱中加热固化 4 h 得到复合涂层。表 2 列出了 PTFE- x SiO₂ 复合涂层混合溶液的配制参数, 其中 x 表示 SiO₂ 的质量分数。

表 2 PTFE- x SiO₂ 复合涂层混合溶液的配制参数

Tab.2 Formulation parameters of the mixed solution of PTFE- x SiO₂ composite coatings

| Samples | PTFE/g | H ₂ O/g | SiO ₂ /g | wt. % |
|-------------------------|--------|--------------------|---------------------|-------|
| PTFE-0SiO ₂ | 10 | 5 | 0 | 0 |
| PTFE-5SiO ₂ | 10 | 5 | 0.75 | 5 |
| PTFE-10SiO ₂ | 10 | 5 | 1.5 | 10 |
| PTFE-15SiO ₂ | 10 | 5 | 2.25 | 15 |
| PTFE-20SiO ₂ | 10 | 5 | 3 | 20 |
| PTFE-30SiO ₂ | 10 | 5 | 4.5 | 30 |
| PTFE-40SiO ₂ | 10 | 5 | 6 | 40 |
| PTFE-50SiO ₂ | 10 | 5 | 7.5 | 50 |

1.2 SEY 测量及放电测试

本研究利用覆铜板模拟空间电子器件环境, 同时给介质薄膜样品的漏电流测试提供导电通道, 采用局域漏电流法^[30]对涂层 SEY 进行测试, 整个测试过程在场发射扫描电子显微镜 (FESEM, Gemini 500) 中进行。图 1a 为测试原理图, SEY 测试流程主要包括 2 个部分: 首先, 将电子枪移动到位置 1 对准法拉第筒, 调节焦距保证电子束聚焦在测试平面, 改变电子束能量 (0.02-10 keV), 利用 FESEM 自带的皮安表测试不同能量下的 I_p ; 然后, 将电子枪移动到位置 2 对准测试样品, 在不同位置测试不同能量下通过样品的漏电流 I_s 。测量时放大倍数保持为 200 倍, 测量面积为 550×375 μm^2 , 电子束流为 80-200 pA。测试得到 I_p 和 I_s 后, 利用式 (1) 计算涂层 SEY (σ)。

$$\sigma = 1 - \frac{I_s}{I_p}$$

(1)

式中: σ 为待测材料的 SEY 值; I_p 为入射电子束流; I_s 为通过样品台的电流。

放电测试在钨灯丝扫描电镜 (SEM, SU3500) 中进行^[31], 图 1b 为测试原理图, 插图图为微带天线及测量点位置, 照射面积为 50×50 μm^2 , 电子束流为 10 nA。当电荷积累达到静电放电的阈值后发生放电, 此时, 感应电荷产生的脉冲电流信号被示波器 (RIGOL DS4032) 检测。测试持续时间为 70 s, 放电脉冲峰值电压大于 5 V 视为一次放电, 记录放电总次数。

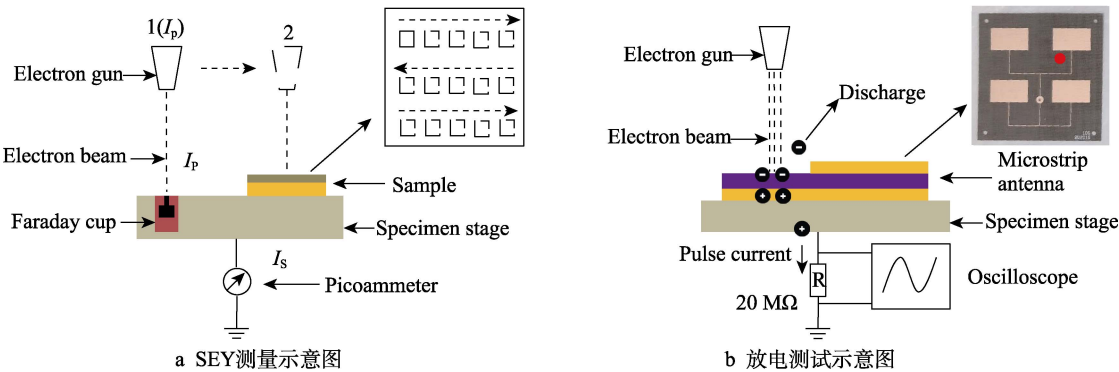


图 1 SEY 测量和放电测试原理图
Fig.1 Schematic diagram of SEY measurement and discharge test:
a) schematic diagram of SEY measurement; b) schematic diagram of discharge test

2 结果及分析

2.1 涂层 SEY 随组分变化规律

图 2 为 PTFE- x SiO₂ 复合涂层的 SEM 图,其中图 2a 右上角插图 of PTFE 薄膜横截面,右下角插图 of 氧化硅粉末,其形状基本为薄层块状或粉末颗粒,尺寸小于 2 μm 。旋涂制备形成 PTFE- x SiO₂ 复合涂层后, SiO₂ 颗粒均为裸露状态。SiO₂ 为低浓度时, SiO₂ 颗粒部分从表面露出,且为倾斜状态,与 PTFE 薄膜成一定夹角;随着浓度的提高, SiO₂ 颗粒更加密集,逐渐覆盖在 PTFE 表面且呈平面状态,如图 2 中箭头及示意图所示。其中,纯 PTFE 涂层由 PTFE 小颗粒构成,用台阶仪 (KLA Tencor D-100, USA) 和 FESEM 测量得到纯 PTFE 涂层厚度约为 210 nm。图 3a 为 PTFE-0SiO₂ 的 F 元素分布图,图 3b—h 为 PTFE-(5~50)SiO₂ 的 Si

元素分布图,可以看出, SiO₂ 在复合涂层中分布均匀。

图 4 为 SEY 测试结果。试验采用逐点扫描进行测试,若存在全局的电荷积累影响,则 SEY 曲线是一条值等于 1 的直线;若存在局部电荷积累影响,随着 SiO₂ 颗粒浓度的增大,SEY 趋近于 1,不会出现平台和最大值。但实际测试曲线中,随着 SiO₂ 颗粒浓度的变化,SEY 存在平台和最大值,因此,本测试方法中不存在电荷积累影响测试的情况。从图 4 中可以看出,纯 PTFE 涂层 E_{p2} 值约为 4 200 eV,而复合涂层 E_{p2} 值均大于 4 500 eV,即掺入 SiO₂ 颗粒使得 E_{p2} 值增大。为了显示复合涂层 SEY 随 SiO₂ 颗粒浓度在低能段 ($<E_{p2}$) 和高能段 ($>E_{p2}$) 的变化趋势,低能段选取 SEY 的最大值 σ_{\max} ,高能段选取电子入射能量为 10 keV 的 σ_{10} 进行对比分析。图 3b 为 σ_{\max} 和 σ_{10} 随 SiO₂ 颗粒浓度的变化规律曲线。在低能段, σ_{\max}

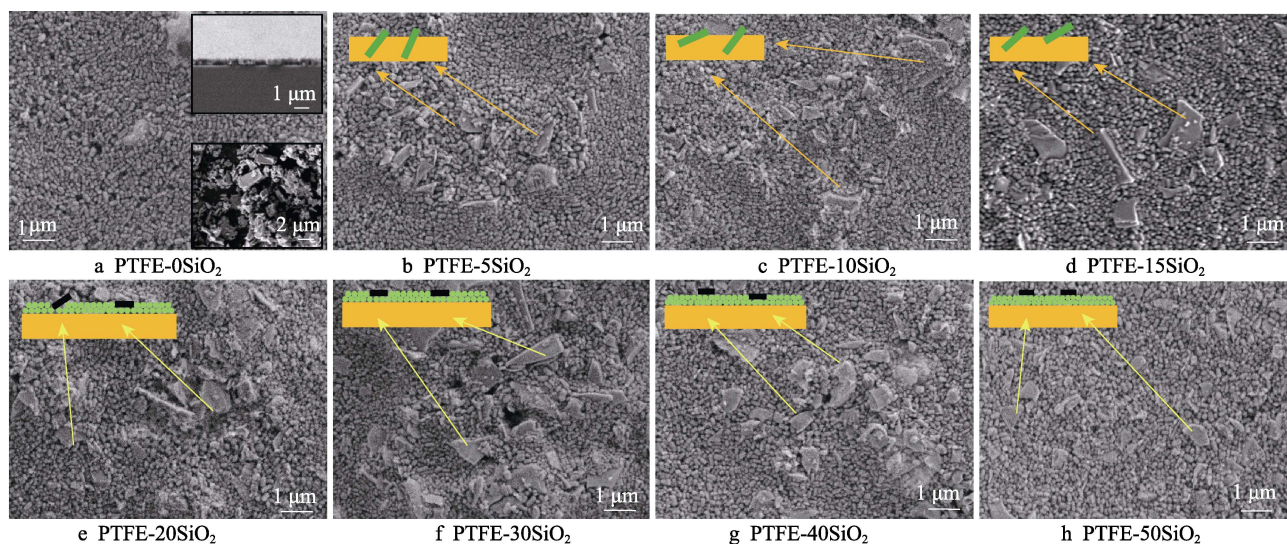


图 2 PTFE- x SiO₂ 复合涂层的表面形貌

Fig.2 Surface morphology of PTFE- x SiO₂ composite coatings

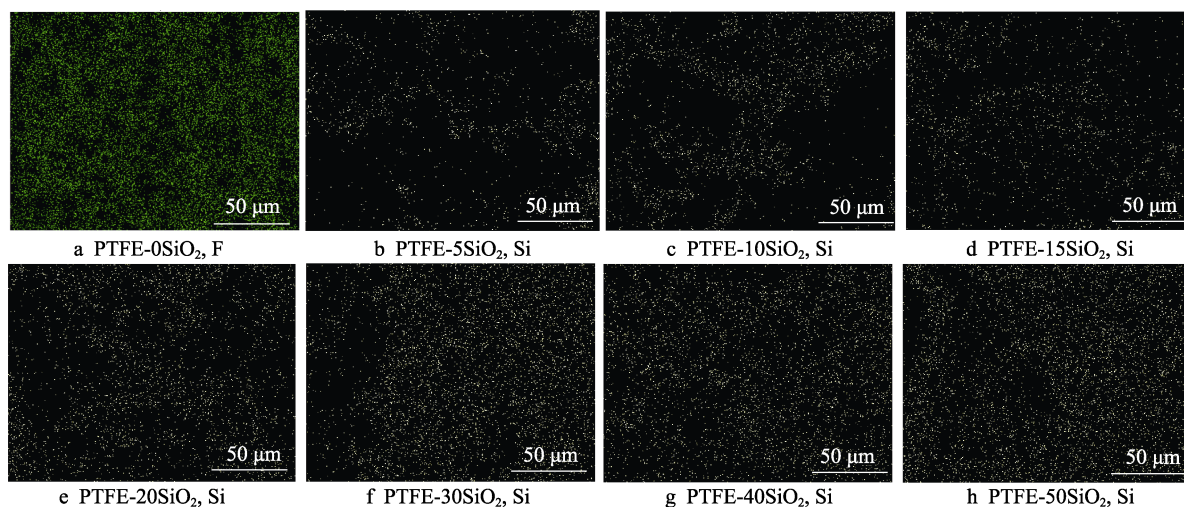


图 3 PTFE- x SiO₂ 复合涂层的 EDS 元素分布

Fig.3 EDS element distribution of PTFE- x SiO₂ composite coatings

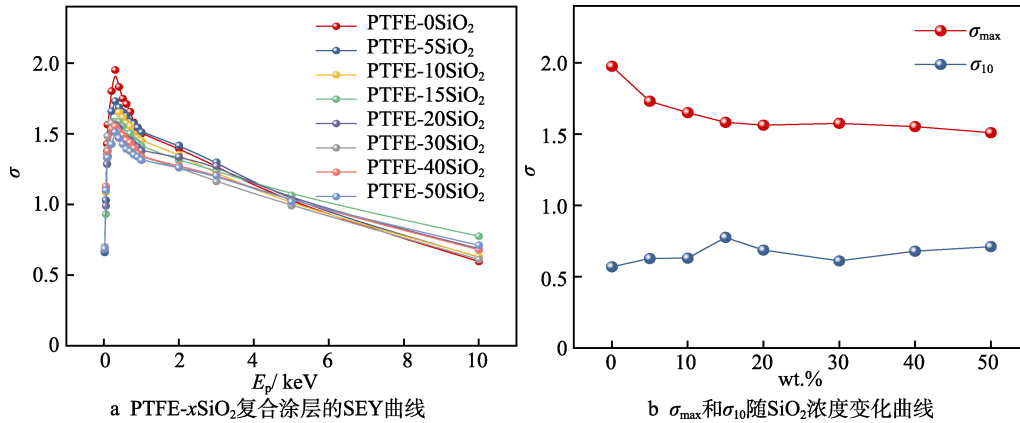


图 4 PTFE-xSiO₂ 复合涂层的 SEY、 σ_{\max} 和 σ_{10}
Fig.4 SEY, σ_{\max} , and σ_{10} of PTFE-xSiO₂ composite coatings: a) SEY curves of PTFE-xSiO₂ composite coatings; b) changing curves of σ_{\max} and σ_{10} with SiO₂ concentration

随 SiO₂ 颗粒浓度的增大呈递减趋势, 且在 SiO₂ 颗粒质量分数大于 15% 后, σ_{\max} 下降趋势减缓, 基本保持不变。在低能段, σ_{10} 随 SiO₂ 颗粒浓度的增大先增大后降低再增大, 质量分数为 15% 时存在最大值。根据 SEY 在低能和高能段的变化规律可以发现, 当 SiO₂ 颗粒质量分数为 15% 时, 达到调控 PTFE 的 SEY 接近于 1 的最佳状态, 此时 σ_{\max} 从 2.0 变化到 1.6, σ_{10} 从 0.6 变化到 0.8。

2.2 涂层 SEY 调控机理

由于低能段和高能段 SEY 随浓度变化曲线的变化规律不一致, 根据膜层特点对其在高能和低能下的调控机理分别进行分析。结合前述分析, 可将复合涂层视为如图 5a 所示的复合结构, SiO₂ 颗粒成不同角度分布在 PTFE 薄膜上, 且随着 SiO₂ 浓度的增大, 平铺 SiO₂ 颗粒比例增大。由于 SiO₂ 成片状颗粒, SEY 无法直接测量, 但其为片状且厚度相对于长宽较小, 可以看成是厚度较大 (>100 nm) 的薄膜样品。利用式 (2) 对氧化硅 SEY^[9] (图 5b) 进行拟合和延伸, 各拟合参数根据垂直入射 MEST 模型^[32]进行设定, 对于氧化硅来说, $a=0.007$, $b=3 \times 10^{-5}$, $s=1.78$,

$\delta_m=4.0$, $E_m=500$, $Z=20$, 因此可以计算得到氧化硅的 σ_{10} 为 0.73。

$$\sigma(E_p) = \frac{0.93}{1 + \frac{E_p}{E_{e1}}} + \frac{0.07}{1 + \frac{E_p}{E_{e2}}} + a(1 - bE_p)E_p^{0.56} \exp\left(-\left(\frac{E_p}{E_b}\right)^{0.7}\right) + \delta_m \frac{s \frac{E_p}{E_m}}{s - 1 + \left(\frac{E_p}{E_m}\right)^s} \quad (2)$$

式中: $\sigma(E_p)$ 为入射电子能量为 E_p 时的 SEY 值; E_p 为入射电子能量; E_{e1} 、 E_{e2} 、 E_b 均为与材料平均原子序数相关的参数, 其中 $E_{e1}=50Z^{1/2}$, $E_{e2}=0.25Z^2$, $E_b=300+175Z$, Z 为材料平均原子序数; a 、 b 、 s 均为与材料特性相关的拟合参数; δ_m 为真二次电子发射系数最大值; E_m 为 δ_m 对应的入射电子能量值。

在低能段, 电子入射深度浅^[33], 只能在材料表层激发二次电子, 尽管 SiO₂ 二次电子系数较大, 但 SiO₂ 颗粒大部分被覆盖, 相对比例较小。倾斜 SiO₂ 的存在会增大复合涂层的粗糙度, 使得式 (2) 中的 δ_m 减

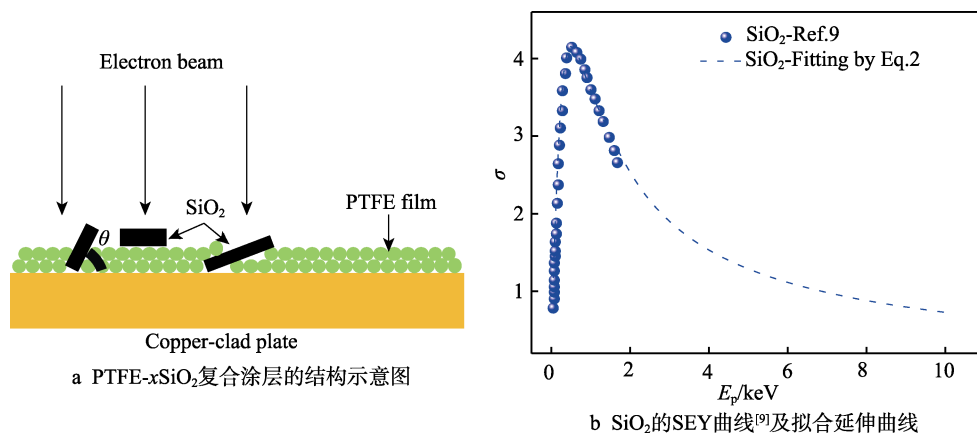


图 5 PTFE-xSiO₂ 复合涂层的结构示意图 (a) 和 SiO₂ 的 SEY 曲线^[9] 及拟合延伸曲线 (b)
Fig.5 Structure diagram of PTFE-xSiO₂ composite coatings (a) and SEY curve^[9] and fitting extension curve of SiO₂ (b)

小,这种遮蔽效应^[34]会使得复合涂层的 SEY 降低。随着 SiO₂ 浓度的增大,其倾斜角度减小,从而降低粗糙度,减弱遮蔽效应。根据 δ_m 随入射角度的变化关系 $\delta_m(\theta)=\delta_m/\cos \theta$ 可知^[35-37], SiO₂ 倾斜角度的减小会降低 SiO₂ 的 SEY,从而降低复合涂层的 SEY。但随着 SiO₂ 浓度的增大,平铺 SiO₂ 比例增大, SiO₂ 露出面积占复合涂层总面积的比例会迅速增大,使得复合涂层的 SEY 增大。在 SiO₂ 浓度较低时,倾斜 SiO₂ 露出面积占复合涂层总面积的比例较小,此时 SiO₂ 高 SEY 带来的 SEY 增强小于其遮蔽效应带来的 SEY 降低,复合涂层 SEY 随着 SiO₂ 浓度的增大而降低。但在 SiO₂ 浓度较高时,倾斜 SiO₂ 露出面积占复合涂层总面积的比例增大, SiO₂ 高 SEY 带来的 SEY 增强与其遮蔽效应带来的 SEY 降低相当,此时复合涂层 SEY 随浓度基本保持不变。因此,在低能段,复合涂层的 σ_{\max} 随 SiO₂ 浓度的增大先降低,然后在 SiO₂ 质量分数大于 15% 时基本保持不变。

在 高能段,由于电子束能量较高,其入射深度与涂层厚度相当^[38-39],因此,电子束能激发 PTFE 覆盖的 SiO₂ 颗粒产生二次电子。此时 SiO₂ 颗粒的 SEY 大于纯 PTFE,当两者构成周期结构时,随着 SiO₂ 颗粒浓度的增大,其 SEY 越接近于 SiO₂ 颗粒本征 SEY^[9]。但因为 SiO₂ 颗粒倾斜角度的存在,使得 SiO₂ 颗粒质量分数为 15% 时, SiO₂ 倾斜角度带来的 SEY 增加量与遮蔽效应带来的减小量差值达到最大,表现为复合涂层 SEY 达到最大值。此时, SiO₂ 浓度的增大使得 SiO₂ 颗粒平铺比例增大并产生较强的屏蔽效应,复合涂层 SEY 反而降低。随着 SiO₂ 浓度的继续增大,复合涂层中 SiO₂ 颗粒基本呈平铺状,涂层 SEY 随 SiO₂ 颗粒浓度的进一步增大而趋于 SiO₂ 本征 SEY,即相当于 SiO₂ 薄膜。因此,在 高能段, SiO₂ 质量分数为 15% 时 σ_{10} 存在极大值,随着浓度的继续增大会趋于 SiO₂ 的本征 SEY。

2.3 涂层对防静电放电性能的影响

利用式(2)对涂层 SEY 曲线进行拟合,结合表面电位变化率与 SEY 的计算公式(式(3))^[27],利用 MATLAB 对 PTFE-xSiO₂ 涂层(x=0、5、15、30)表面电位 V_{SP} 随时间的变化关系进行数值仿真计算^[28]。其中,表面电位 V_{SP} 等于表面电位变化率随时间的积分。从式(3)可知, σ 越接近于 1,其电荷积累速率越慢。图 6 显示了 300 eV 和 10 keV 下不同涂层的表面电位随电子束持续轰击时间的变化过程,图中表格列出了不同涂层的平衡电位 V_{EP} 与电势上升速率 R_{PR} ,计算发现,负电荷平衡电势远大于正电荷平衡电势,且负电荷平衡电势等于电子束能量与 E_{p2} 的差值。复合涂层对正电荷平衡电势影响较小,且由于正电荷平衡电势低,后续测试主要关注高能电子束轰击下的负电荷沉积情况。当 SiO₂ 质量分数为 15% 时,其 E_{p2} 和 σ_{10} 值最大,因此涂层平衡电势及电势上升速率最小。表 3 为静电放电测试结果,可以看出,纯 PTFE 涂层不能提升天线的抗静电放电能力,而复合涂层能有效提高放电阈值,减少放电次数,浓度高时抑制放电效果更明显。除了 SEY 的影响,表面粗糙度也会使得涂层的放电阈值提高^[23-25],从而减少放电的发生。虽然高浓度下的 SEY 相对于 15% 时较小,但表面粗糙度的增大也会提升防静电放电的能力。因此,当 SiO₂ 质量分数大于 15% 时,复合涂层抑制静电放电的发生频率和增大静电放电的阈值有明显效果。

$$\Delta V_s = -\frac{I_p t(1-\sigma)}{\pi(1+\epsilon_r) \cdot \epsilon_0 S} \quad (3)$$

式中: ΔV_s 为表面电势变化率; t 为电子束辐照时间; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为材料介电常数; I_p 为电子束流大小; S 为电子束辐照面积; σ 为电子轰击材料时具有的能量对应的 SEY 值。

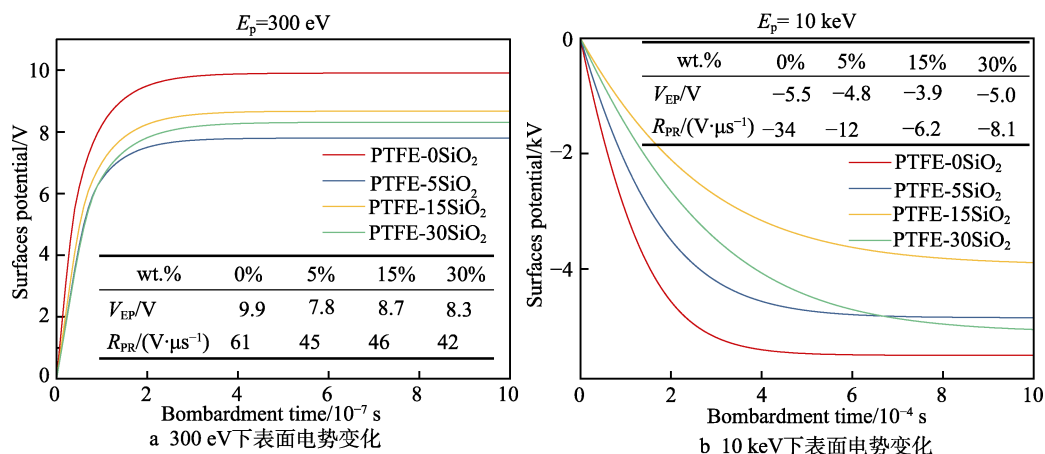


图6 PTFE-xSiO₂ 涂层表面电势在电子束能量为 300 eV 和 10 keV 时随轰击时间的变化曲线
Fig.6 Surface potential curves of PTFE-xSiO₂ coatings with bombardment time at electron beam energies of 300 eV and 10 keV: a) surface potential change at 300 eV; b) surface potential change at 10 keV

表 3 PTFE- x SiO₂ 复合涂层在不同电子束
能量下的放电次数

Tab.3 Number of discharges of PTFE- x SiO₂ composite coatings at different electron beam energies

| Energy/ keV | No coating | PTFE- 0SiO ₂ | PTFE- 5SiO ₂ | PTFE- 15SiO ₂ | PTFE- 30SiO ₂ |
|----------------|---------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 12 | 13 | 4 | 4 | 3 |
| 30 | 15 | 18 | 7 | 5 | 5 |

3 结论

- 1) 掺杂 SiO₂ 颗粒的复合涂层能有效提高 PTFE 涂层的 E_{p2} 值, 降低涂层低能段的 SEY, 增大涂层高能段的 SEY。
- 2) 倾斜 SiO₂ 颗粒的高 SEY 和遮蔽效应对 SEY 起调控作用, 当 SiO₂ 颗粒质量分数为 15% 时, 其对复合涂层 SEY 的调控效果最显著。
- 3) 掺杂 SiO₂ 颗粒的复合涂层能有效提高放电阈值, 降低电荷积累速率, 减少放电次数, 提升电子器件防静电放电能力。

参考文献:

[1] GARRETT H B, WHITTLESEY A C. Spacecraft Charging, an Update[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(6): 2017-2028.

[2] KOONS H C, MAZUR J E, SELESNICK R S, et al. The Impact of the Space Environment on Space Systems[C]// Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference. Massachusetts, USA: Spacecraft Charging Technical Conference Committee, 2000: 7-10.

[3] MURTHY P V N, RAGHAVIAH V, SOWJANYA P, et al. Study on EMI/ESD Effects of Electric Propulsion System on Spacecraft Systems and Mitigation Techniques[C]//2016 International Conference on Electro Magnetic Interference & Compatibility (INCEMIC). Bengaluru, India: IEEE, 2017: 1-4.

[4] 吴汉基, 蒋远大, 张志远, 等. 航天器表面电位的主动控制[J]. 中国航天, 2008(6): 36-40.
WU Han-ji, JIANG Yuan-da, ZHANG Zhi-yuan, et al. Active Control of Spacecraft Surface Potential[J]. Aerospace China, 2008(6): 36-40.

[5] SCHMIDT R, ARENDS H, NIKOLAIZIG N, et al. Ion Emission to Actively Control the Floating Potential of a Spacecraft[J]. Advances in Space Research, 1988, 8(1): 187-192.

[6] 刘尚合, 胡小锋, 原青云, 等. 航天器充放电效应与防护研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2108-2118.

LIU Shang-he, HU Xiao-feng, YUAN Qing-yun, et al. Research Progress of Spacecraft Charging and Discharging Effect and Protection[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2108-2118.

[7] 杨生胜, 陈益峰, 秦晓刚, 等. 空间静电放电抑制新技术研究[C]//中国物理学会第二十届全国静电学术会议论文集. 石家庄: 中国物理学会静电专业委员会, 2015: 366-368.
YANG Sheng-sheng, CHEN Yi-feng, QIN Xiao-gang, et al. Research on New Space Electrostatic Discharge Suppression Technology[C]//Proceedings of the 20th National Electrostatic Academic Conference of Chinese Physical Society. Shijiazhuang: Chinese Physical Society Electrostatic Professional Committee, 2015: 366-368.

[8] 史亮, 杨生胜, 秦晓刚, 等. 星内静电放电防护涂层技术研究[C]//中国物理学会第二十届全国静电学术会议论文集. 石家庄: 中国物理学会静电专业委员会, 2015: 369-372.
SHI Liang, YANG Sheng-sheng, QIN Xiao-gang, et al. Research on Electrostatic Discharge Protection Coating Technology in Satellite[C]//Proceedings of the 20th National Electrostatic Academic Conference of Chinese Physical Society. Shijiazhuang: Chinese Physical Society Electrostatic Professional Committee, 2015: 369-372.

[9] SCHREIBER E, FITTING H J. Monte Carlo Simulation of Secondary Electron Emission from the Insulator SiO₂[J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2002, 124(1): 25-37.

[10] YONG Y C, THONG J T L, PHANG J C H. Determination of Secondary Electron Yield from Insulators Due to a Low-kV Electron Beam[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(8): 4543-4548.

[11] CAI Ya-hui, WANG Dan, QI Kang-cheng, et al. Measurement of Total Electron Emission Yield of Insulators Based on Self-Terminating Charge Neutralization[J]. The Review of Scientific Instruments, 2022, 93(5): 055103.

[12] CAO Wei-wei, WANG Bo, YANG Yang, et al. Secondary Electron Emission Characteristics of the Al₂O₃/MgO Double-Layer Structure Prepared by Atomic Layer Deposition[J]. Ceramics International, 2021, 47(7): 9866-9872.

[13] LI Jie, HU Wen-bo, WANG Kang, et al. Au Doping Effect on the Secondary Electron Emission Performance of MgO Films[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(11): 2104.

[14] LI Jie, HU Wen-bo, HAO Ling, et al. Secondary Electron Emission Enhancement of MgO/Au Composite Film by Adopting a Gold Buffer Layer[J]. Materials Research Bulletin, 2019, 118: 110493.

[15] SONG Bai-peng, SHEN Wen-wei, MU Hai-bao, et al. Measurements of Secondary Electron Emission from Dielectric Window Materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(8): 2117-2122.

[16] FENG Guo-bao, LIU Lu, LI Xiao-jun, et al. Characteristics of Surface Discharging and Gas Desorption of PTFE Due to Electron Beam Irradiation[J]. Physics of

- Plasmas, 2021, 28(5): 053301.
- [17] YANG K Y, HOFFMAN R W. Electron Yields and Escape Depths from Kapton and Teflon[J]. *Surface and Interface Analysis*, 1987, 10(2/3): 121-125.
- [18] WILLIS R F, SKINNER D K. Secondary Electron Emission Yield Behaviour of Polymers[J]. *Solid State Communications*, 1973, 13(6): 685-688.
- [19] NITTA K, MIYAZAKI E, TAKAHASHI M. Influence of Atomic Oxygen Irradiation on Secondary Electron Emission Yield of Polyimide Films[C]//24th ISDEIV. Braunschweig, Germany: IEEE, 2010: 552-555.
- [20] 全荣辉, 张振龙, 韩建伟, 等. 电子辐照下聚合物介质深层充电现象研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(2): 1205-1211.
- QUAN Rong-hui, ZHANG Zhen-long, HAN Jian-wei, et al. Phenomenon of Deep Charging in Polymer under Electron Beam Irradiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 1205-1211.
- [21] SANTOS L F, CHINAGLIA D L, FARIA R M. Transient Current Effects on Poly(O-Methoxyaniline) Films Irradiated by Pulsed Electron Beam[J]. *Synthetic Metals*, 1999, 101(1/2/3): 484-485.
- [22] ALLEN N L, FAIRCLOTH D C. Corona Propagation and Charge Deposition on a PTFE Surface[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(2): 295-304.
- [23] XUE Jian-yi, WANG Han, CHEN Jun-hong, et al. Effects of Surface Roughness on Surface Charge Accumulation Characteristics and Surface Flashover Performance of Alumina-Filled Epoxy Resin Spacers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(8): 083302.
- [24] YAMAMOTO O, TAKUMA T, HAMADA S, et al. Influence of Surface Roughness on the Charging of Insulating Spacers in Vacuum[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2001, 135(3): 16-25.
- [25] YAMAMOTO O, TAKUMA T, FUKUDA M, et al. Improving Withstand Voltage by Roughening the Surface of an Insulating Spacer Used in Vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(4): 550-556.
- [26] GARRETT H B. The Charging of Spacecraft Surfaces[J]. *Reviews of Geophysics*, 1981, 19(4): 577-616.
- [27] ZARBOU K, SI AHMED A, MOYA G, et al. Stability of Trapped Charges in Sapphires and Alumina Ceramics: Evaluation by Secondary Electron Emission[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(5): 054107.
- [28] 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[J]. *科学通报*, 2022, 67(2): 212-220.
- WANG Dan, CAI Ya-hui, MAO Zhang-song, et al. Evolution of Dielectric Surface Potential Induced by Electron Beam Radiation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(2): 212-220.
- [29] 朱天容, 喻晓阳, 王刚, 等. ZnO 量子点-聚酰亚胺薄膜的制备、表征及性能研究[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 409-414.
- ZHU Tian-rong, YU Xiao-yang, WANG Gang, et al. Preparation, Characterization and Properties of ZnO Quantum Dots-Polyimide Membrane[J]. *Journal of Jiangnan University Natural Science Edition*, 2018, 46(5): 409-414.
- [30] CHEN Yu, KOUNO T, TOYODA K, et al. Total Electron Emission Yield Measurement of Insulator by a Scanning Small Detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(15): 152101.
- [31] CZEREMUSZKIN G, LATRÈCHE M, WERTHEIMER M R. Charging/Discharge Events in Coated Spacecraft Polymers during Electron Beam Irradiation in a Scanning Electron Microscope[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 2001, 185(1-4): 88-99.
- [32] DE LARA J, PEREZ F, ALFONSECA M, et al. Multipactor Prediction for On-Board Spacecraft RF Equipment with the MEST Software Tool[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(2): 476-484.
- [33] SEILER H. Secondary Electron Emission in the Scanning Electron Microscope[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(11): R1-R18.
- [34] ZHANG Na, CAO Meng, CUI Wan-zhao, et al. Effect of Rough Surface Morphology on Secondary Electron Emission from Metal Surface[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(7): 075802.
- [35] YE Ming, WANG Dan, HE Yong-ning. Mechanism of Total Electron Emission Yield Reduction Using a Micro-Porous Surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(12): 124901.
- [36] YE Ming, HE Yong-ning, HU Shao-guang, et al. Investigation into Anomalous Total Secondary Electron Yield for Micro-Porous Ag Surface under Oblique Incidence Conditions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114: 104905.
- [37] WANG Dan, HE Yong-ning, YE Ming, et al. Secondary Electron Emission Characteristics of Nanostructured Silver Surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(15): 153302.
- [38] WILSON G, DENNISON J R. Approximation of Range in Materials as a Function of Incident Electron Energy[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(2): 291-297.
- [39] WERNER W S M. Electron Transport in Solids for Quantitative Surface Analysis[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2001, 31(3): 141-176.