

氧化铝表面二次电子发射抑制及其在微放电抑制中的应用*

孟祥琛¹⁾²⁾³⁾ 王丹^{1)†} 蔡亚辉¹⁾ 叶振⁴⁾ 贺永宁¹⁾ 徐亚男⁵⁾

1) (西安交通大学微电子学院, 西安 710049)

2) (西安中科原子精密制造科技有限公司, 西安 710119)

3) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

4) (西安泰斯特检测技术有限公司, 西安 710076)

5) (上海空间推进研究所, 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

(2022年12月18日收到; 2023年3月7日收到修改稿)

空间大功率微波器件中的二次电子倍增现象会诱发微放电效应, 使得器件性能劣化或失效. 针对加载氧化铝的同轴低通滤波器进行建模, 并通过微放电阈值仿真验证了降低放电敏感表面的二次电子产额 (SEY) 可有效提升器件微放电阈值. 针对器件中易于发生微放电的氧化铝表面, 应用激光刻蚀制备表面微结构, 获得孔隙比例为 67.24%、平均深宽比例为 1.57 的微孔结构, 氧化铝 SEY 峰值 (δ_m) 由 2.46 降低至 1.10. 应用磁控溅射工艺研究氮化钛 (TiN) 薄膜低 SEY 特性, 当 N_2 与 Ar 流量比为 7.5:15 时, TiN 薄膜 δ_m 低至 1.19. 在激光刻蚀微结构氧化铝表面镀膜 TiN 薄膜, 实现表面 SEY 的剧烈降低, δ_m 降至 0.79. 通过仿真电子束辐照氧化铝表面带电特性, 分析了表面带电水平对 SEY 的影响规律, 以及低 SEY 表面抑制微放电的物理机制. 选取填充了纯度为 99.5% 氧化铝片的同轴滤波器进行验证, 结果表明: 微结构氧化铝表面镀膜 TiN 薄膜后, 器件微放电阈值由 125 W 增加至 650 W. 研究对于介质填充微波器件微放电效应抑制机理分析具有重要科学意义, 对于提高微波器件微放电阈值具有工程应用价值.

关键词: 二次电子发射, 氧化铝, 微放电, 微结构

PACS: 79.20.Hx, 73.43.Cd, 81.40.-z

DOI: 10.7498/aps.72.20222404

1 引言

氧化铝是一种应用广泛的陶瓷材料, 具有介电性好、硬度高、隔热性好、介质损耗低和击穿电压高等优点, 在空间大功率微波系统中有广泛应用^[1-4]. 例如氧化铝被广泛应用于微波介质窗的基体材料以实现真空中微波源向外部环境的能量传输^[3], 此

外在诸如同轴滤波器和阻抗变压器等微波器件中, 氧化铝基片可作为填充件提高器件的微波传输性能^[4]. 空间环境中工作的微波器件时刻受到宇宙射线以及粒子辐照的影响, 这使得器件中填充的氧化铝基片表面不可避免会产生二次电子发射 (SEE) 现象, 激发的二次电子有可能在大功率射频电场的作用下发生谐振倍增, 进一步诱发微放电效应 (也称为二次电子倍增放电效应)^[5]. 微放电效应的发生会损

* 国家自然科学基金 (批准号: 62101425, 52127817)、陕西省重点研发计划 (批准号: 2021LLRH-03)、上海市科学技术委员会 (批准号: 17DZ2280800)、中国科学院重大科研仪器设备研制项目 (批准号: ZDKYYQ20220007) 和中国科学院重点部署项目 (批准号: ZDRW-XH-2021-6) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: alexaustin@xjtu.edu.cn

伤器件表面,劣化器件性能,严重时甚至会使得微波系统整体失效^[6-8],2008年欧洲航天局(EESA)公开报道了部分实验过程中由于微放电效应发生导致的微波器件损伤实例^[7].

近年来,国内在微放电原理研究与抑制技术方面取得了长足进展.2017年,中国空间技术研究院胡天存等^[8]提出了一种基于ZnO纳米阵列的银膜微陷阱结构制备方法,该工艺实现金属银表面SEE系数的显著降低.2018年,翟永贵等^[9]研究了介质部分填充平行平板的微放电过程,分析了介质表面电荷积累作用对微放电的影响.2020年,张娜等^[10]报道了三维圆柱孔结构对SEE调控作用,采用蒙特卡罗方法系统研究了三维规则表面形貌参调控SEE的规律.2022年,李韵等^[11]报道了铁磁性微波器件微放电机理,进一步研究了铁氧体环形器SEE特性的调控方法与工艺实现.不过,关于氧化铝介质填充的微波器件SEE效应调控的报道仍较少,相关技术与原理有待深入探索.

氧化铝表面二次电子产额(SEY)峰值(δ_m)通常在3以上,最高可至9^[12-16],较高的SEY是使得氧化铝作为微波器件加载基片时表面发生二次电子倍增的主要原因.SEY受其本征物理特性(密度、电导和能带结构等)、表面形貌及表面状态(吸附、沾污和氧化等)影响显著,因此可通过调控这些参数来降低氧化铝表面SEY^[17-20].较为成熟的SEY抑制方法包括表面粗糙化和表面镀膜^[18,20].针对氧化铝,可通过刻蚀和机加工等表面减材制造技术实现粗糙化,阻断电子的运动空间.在低SEY薄膜方面TiN是公认的低SEY材料,其 δ_m 约为1.5,在抑制加速器二次电子倍增导致的电子云方面得到应用^[20-25].此外在微波介质窗中,可应用TiN作为镀层材料,大幅提高介质窗的放电阈值,提高器件可靠性^[25],因此可将TiN以薄膜形式覆盖在氧化铝表面达到抑制SEY的目的.

本文以氧化铝填充微波器件微放电阈值提升为目标,开展了氧化铝加载方同轴低通滤波器微放电阈值仿真计算,和氧化铝低SEY表面处理工艺及相关机理研究,并最终在氧化铝加载的方同轴低通滤波器中实现了器件级应用验证.研究中应用激光刻蚀在氧化铝表面制备不同特征尺寸的微结构,应用磁控溅射在微结构氧化铝表面制备TiN薄膜,验证表面微结构制备和表面膜层镀制对SEY的降低作用,实现氧化铝表面SEY的双重抑制.通过分

析单边与双边微放电发生的物理机制,论证了氧化铝表面SEE过程和表面电荷积累效应对微放电效应的影响趋势.最终将优选的低SEY表面处理工艺应用于氧化铝加载的方同轴低通滤波器中,实现了器件微放电阈值的大幅提高.

2 仿真与实验

2.1 器件建模与微放电仿真

本文针对同轴低通滤波器开展微放电仿真与实验研究,使用CST软件进行器件建模及其电学性能参数仿真,器件微放电特性仿真通过SPARK3D软件实现.SPARK3D是CST软件中仿真微波无源器件放电特性的模块,用于实现微波无源器件(波导、微带和天线等)发生二次电子倍增放电和气体放电功率的求解.SPARK3D模块应用蒙特卡罗方法与三维电子跟踪模型对器件限定区域内的电子数量进行求解,可计算出器件在不发生微放电情况下的最大工作功率,获得器件在不同状态下的微放电阈值数据.在SPARK3D软件中,可以输入SEY曲线关键参数并应用Vaughan模型实现SEE结果模拟,也支持用户自主导入特定材料SEY曲线,此外软件中可以设置输入功率、求解精度和种子电子数量等值.

微放电仿真过程如下:1)确定器件几何结构,并应用CST软件进行器件建模,仿真器件电特性参数确保满足要求;2)仿真器件在特定频率下的电场和磁场分布,并将仿真得到的网格信息及电磁场分布情况导入SPARK3D模块;3)在SPARK3D中划定仿真区域,并设定材料SEY数据、输入功率、种子电子数量和求解精度等参数;4)以上设定结束后开始仿真,仿真完成后得到划定区域内不同功率下电子数量随时间的变化规律.需要说明的是,SPARK3D求解击穿功率时采用二分法,在每轮计算中,当输入功率使得电子在区域中发生倍增导致击穿时,软件会将输入功率降低至一半并重新开始仿真;若输入功率没有导致击穿,则取该功率与距离最近的击穿功率的平均值重新计算,直到最终结果逐渐逼近实际微放电阈值.

2.2 氧化铝表面微结构制备

探索实验中研究对象氧化铝的尺寸为20 mm×10 mm×1 mm,纯度为90%.使用激光刻蚀实现氧化铝表面微结构制备,脉冲式红外光纤激光器

(GSS-Fiber-20, 西安高斯激光, 中国) 的激光源波长为 1064 nm, 激光最大功率为 20 W, 最小可控线宽为 10 μm , 最大加工面积为 110 mm \times 110 mm, 焦距为 150 mm, 工作环境为大气. 实验通过改变刻蚀形状控制表面孔隙比例, 通过改变刻蚀周期数控制刻蚀深度, 刻蚀图样及相关特征尺寸如图 1 所示, 其中参数 d 为单个方孔边长, 参数 h 为微孔平均深度. 孔隙比例定义为: 单元内刻蚀方孔面积与单元总面积之比. 实验共制备了 4 组不同微孔深度的微结构 (样品 #1—#4), 刻蚀功率为 20 W, 单个微孔边长为 160 μm , 刻蚀周期数分别为 5, 10, 20 和 40; 同时制备了 4 组不同孔隙比例微结构的微结构 (样品 #4—#7), 刻蚀功率为 20 W, 刻蚀周期数均为 40, 单个微孔直径分别为 160, 130, 100 和 70 μm .

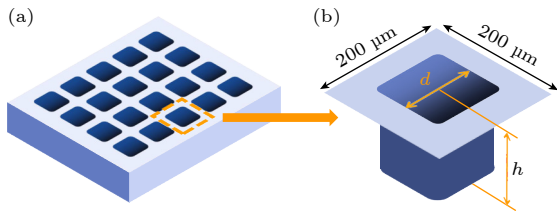


图 1 氧化铝表面刻蚀图样 (a) 方孔阵列微孔表面; (b) 方孔刻蚀单元

Fig. 1. Etching patterns on alumina surface: (a) Porous surface with square hole array; (b) etching cell of square hole.

2.3 TiN 薄膜制备

实验选用直流磁控溅射制备 TiN 薄膜, 以具有低电阻率 ($\leq 2 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$) 的 N 型硅为衬底 (晶向 100), 选取 5 组工艺参数进行实验, 最终筛选出能够实现最优低 SEY 特性的 TiN 薄膜制备工艺. 实验前, 依次使用丙酮、酒精和超纯水对衬底进行超声清洗, 用氮气吹干. 溅射源为高纯 TiN 陶瓷靶 (纯度为 99.99%, 直径为 76.2 mm, 厚度为 5 mm). 溅射前, 腔内本底真空抽至低于 $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 溅射过程中通入氩气 (Ar, 纯度为 99.99%) 作为工作气体, 通入氮气 (N_2 , 纯度为 99.99%) 作为反应气体, 使用流量计实现气体流量的精确控制. 实验中溅射电流 0.25 A, 工作气压 1.2 Pa, Ar 流量 15 sccm (1 sccm = 1 mL/min), N_2 流量分别设置为 0, 5, 7.5, 10, 15 sccm, 5 组工艺参数获得的样品依次记为 TiN#1—#5.

2.4 表面形貌及 SEY 测试

使用激光扫描显微镜 (Keyence VK9700, 日本)

对激光刻蚀样品三维轮廓进行表征, 使用原子力显微镜 (AFM, Bruke Innovation, 德国) 对 TiN 薄膜表面粗糙度进行表征, TiN 薄膜厚度通过扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi S4800, 日本) 观测截面得到.

样品 SEY 测试由 2 组平台实现. TiN 薄膜样品导电性良好, 采用样品电流法进行 SEY 测试, 相关测试原理及误差分析可参考文献 [26]. 具体步骤为: 首先对样品施加 +500 V 偏压, 在某一能量的种子电子垂直入射后, 产生的二次电子受正偏压吸引返回表面, 此时测量流过样品电流为入射电子束流 I_p ; 接着对样品施加 -20 V 偏压, 重新入射同一能量的种子电子, 二次电子在负偏压下受排斥作用加速远离样品, 测得流过样品的电流 I_s . I_p 与 I_s 的差值即为二次电子的束流, 该差值与 I_p 的比值即为该入射能量下的 SEY.

对于氧化铝, 由于其导电特性较差故采用收集极法测试 SEY. 该 SEY 测试平台自主研发, 仪器配备 2 把中和枪 (中和枪 1 与中和枪 2) 用以消除介质表面电荷积累, 相关测试原理可参考文献 [27]. 具体测量步骤如下. 首先初级电子垂直入射样品, 二次电子被正偏的收集极捕获, 测得二次电子电流 I_{SE} . 之后对比样品表面电位 V_S 和接地电位 V_B , 若 $V_S > V_B$, 则中和枪 1 发射电子消除表面积累的正电荷直至 $V_S = V_B$; 否则中和枪 2 启动并发射能量约为 300 eV 的电子, 此时 SEE 过程会导致表面积累正电荷, 产生的正电荷与原始表面积累的电子中和, 直至 $V_S > V_B$. 然后中和枪 2 关闭, 中和枪 1 启动并消除表面正电荷直至 $V_S = V_B$. 表面电位中和完成后, 开始下一个初始电子能量 (记为 E_p) 点的 SEY 测量.

微放电阈值测试由西安泰斯特检测技术有限公司完成, 该微放电测试系统能够输出 2000 W 以内的连续波, 测量频率为 1—4 GHz, 真空度低于 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 测试中可实现的环境测试温度为 $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $+150 \text{ }^\circ\text{C}$.

3 结果与讨论

3.1 低 SEY 抑制微放电仿真验证

图 2 为应用 CST 软件建立的加载氧化铝陶瓷基片的同轴低通滤波器仿真模型. CST 仿真结果表明: 器件在工作过程中存在 2 处强电场区域,

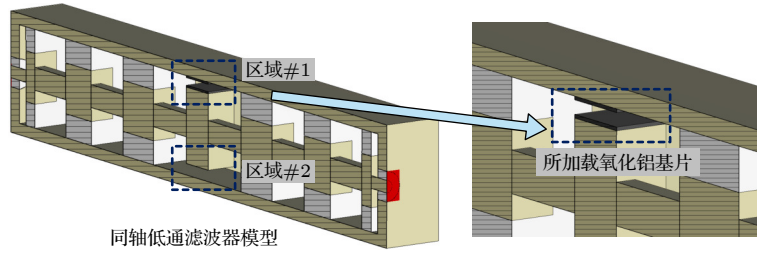


图 2 同轴低通滤波器仿真模型

Fig. 2. Simulation model of designed coaxial low pass filter.

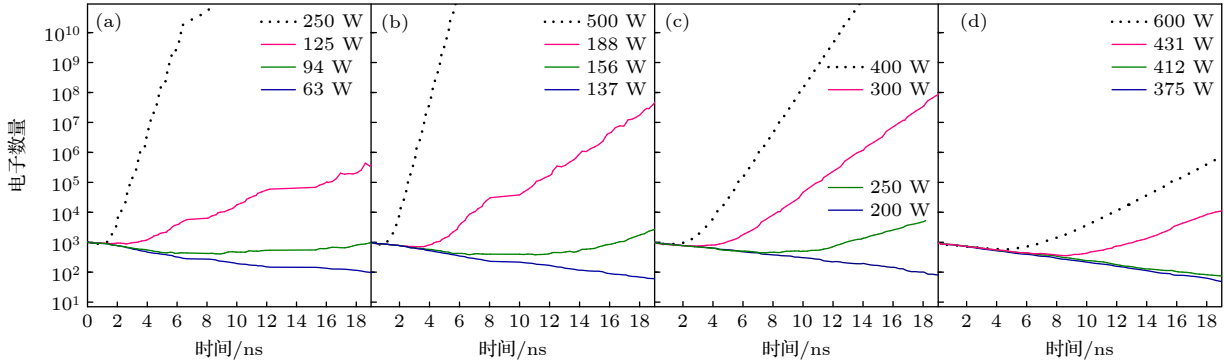


图 3 四组氧化铝加载器件在不同输入功率下的电子数量变化过程仿真 (a) 第 1 组 ($\delta_m = 4.3$, $E_{pm} = 500$ eV); (b) 第 2 组 ($\delta_m = 3.6$, $E_{pm} = 450$ eV); (c) 第 3 组 ($\delta_m = 2.5$, $E_{pm} = 400$ eV); (d) 第 4 组 ($\delta_m = 1.2$, $E_{pm} = 300$ eV)

Fig. 3. Simulated evolution of electron number for the four groups alumina-loaded devices with various input powers: (a) Group 1 ($\delta_m = 4.3$, $E_{pm} = 500$ eV); (b) group 2 ($\delta_m = 3.6$, $E_{pm} = 450$ eV); (c) group 3 ($\delta_m = 2.5$, $E_{pm} = 400$ eV); (d) group 4 ($\delta_m = 1.2$, $E_{pm} = 300$ eV).

即图 2 中区域#1 与区域#2, 通过 SPARK3D 进行微放电仿真, 确定这 2 处区域为微放电敏感区域, 即随着功率的提升, 该区域易于发生二次电子倍增。

仿真设置器件工作频率为 1.8 GHz, 种子电子数量为 1000 个. 研究中共仿真了 2 组 SEY 参数下的器件微放电规律, 记为第 1—4 组 (表 1), 同时表 1 给出了 4 组 SEY 参数下器件微放电阈值的仿真结果. 图 3 为 4 组 SEY 参数下, 输入功率变化时, 器件内电子数量随时间变化的规律, 图中 E_{pm} 为 SEY 曲线中 δ_m 对应的初始电子能量. 由图 3 可知, 若工作功率超过微放电阈值, 则电子数量会在十几纳秒内快速倍增, 使得器件敏感区域发

生微放电; 若工作功率小于微放电阈值, 则电子数量会逐渐降低, 不会诱发微放电. 对比 4 组仿真参数及其对应的微放电阈值可知, 材料表面 SEY 较高时会限制器件的工作功率, 因此降低微放电敏感区域表面的 SEY 对于提升器件工作功率和提高器件稳定性是十分必要的。

3.2 激光刻蚀氧化铝表面形貌与 SEY 测试

由 3.1 节仿真结果可知, 降低同轴低通滤波器中所加载氧化铝基片表面 SEY 能够显著提升器件的微放电阈值, 因此本节开展氧化铝低 SEY 表面处理工艺相关研究. 图 4(a)—(g) 为激光刻蚀得到的表面微结构氧化铝样品三维轮廓图, 图 4(h) 为未经处理的原始氧化铝样品#8 表面粗糙度表征结果, 表 2 中各样品特征尺寸 (实际微孔边长、微孔平均深度和实际孔隙比例) 通过图 4 中的三维轮廓图测量得到. 对比 2.2 节中的刻蚀参数和表 2 中特征尺寸可知: 微孔深度与刻蚀周期数呈正相关, 即刻蚀周期越多, 孔深越大, 该结果达到实验中通过控制刻蚀周期数来调控微孔深度的目的. 此外由

表 1 器件加载不同 SEY 氧化铝微放电阈值仿真结果

Table 1. Simulated multipactor threshold of the alumina-loaded devices with various SEY.

参数	第1组	第2组	第3组	第4组
δ_m	4.3	3.6	2.5	1.2
微放电阈值/W	82.52	139.65	223.43	426.54

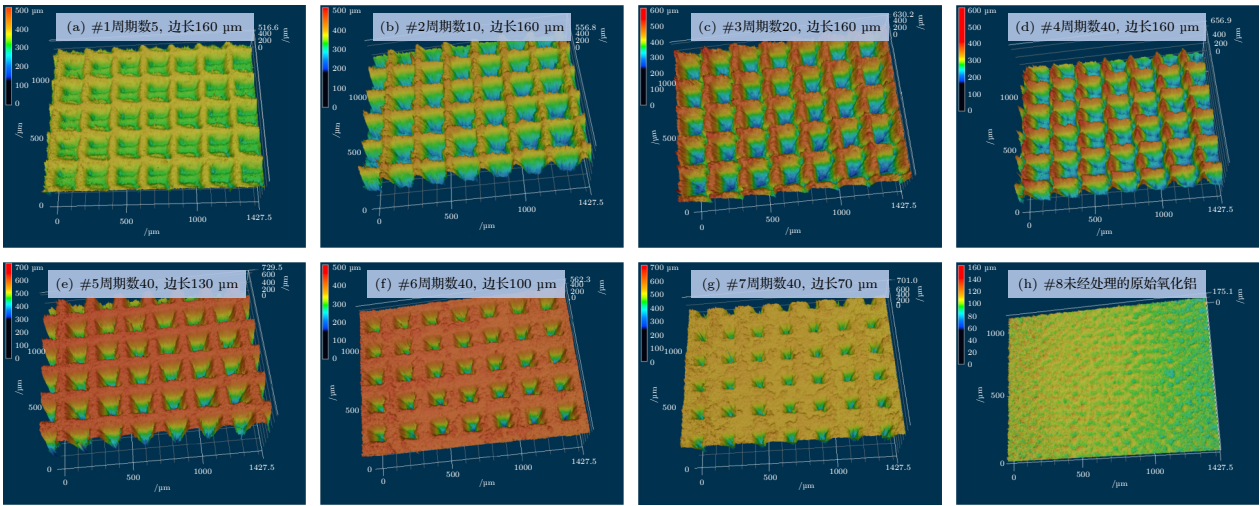


图 4 激光刻蚀微结构氧化铝样品三维轮廓 (a)–(d) 样品#1–#4, 孔隙比例相似但深度不同; (d)–(g) 样品#4–#7, 深度相似但孔隙比例不同; (h) 样品#8, 未经处理的原始氧化铝

Fig. 4. 3D morphologies of laser-etched porous alumina samples: (a)–(d) Sample #1 to #4, similar porosity but different depths; (d)–(g) sample #4 to #7, similar depth but different porosity; (h) sample #8, untreated original alumina.

表 2 激光刻蚀微结构的特征参数测量结果

Table 2. Measured feature parameters of laser-etched microstructures.

参数	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
实际微孔边长/ μm	158	160	161	164	134	106	78
微孔平均深度/ μm	34	112	198	257	264	259	272
实际孔隙比例/%	62.41	64.00	64.80	67.24	44.89	28.09	15.21

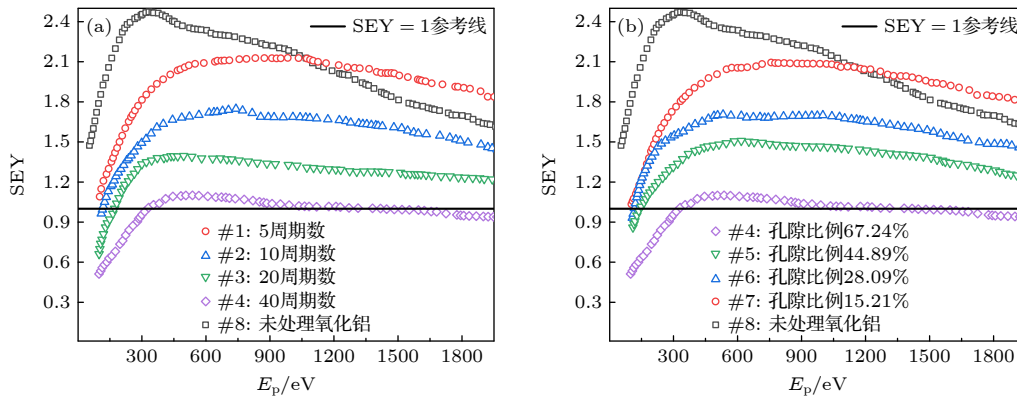


图 5 表面微结构氧化铝样品 SEY 曲线 (a) 样品#1–#4; (b) 样品#4–#7

Fig. 5. SEY curves of alumina samples with surface microstructure: (a) Samples #1 to #4; (b) samples #4 to #7.

表 2 可知: 各样品表面微孔实际边长稍大于原设计边长 d , 即实际表面孔隙比例大于理论设计, 这一现象主要受激光刻蚀精度和刻蚀过程中横向扩散效应的影响, 具体可参考文献 [18]. 由最终的三维轮廓表征结果可知: #1–#4 孔隙比例相近, 微孔深度依次增大; #4–#7 平均孔深相近, 孔隙比例依次减小; 以上样品实际尺寸尽管与设计尺寸略有误差, 但满足实验中控制变量的要求.

图 5 为微结构氧化铝样品 SEY 测试结果, 由图 5 可知: 除样品#1 和#7 外, 其他微结构样品均表现出显著的 SEY 抑制效果, 其中刻蚀周期数为 40 的样品#4 SEY 最低 ($\delta_m=1.10$), 相比于未经处理的样品#8 ($\delta_m=2.46$), 下降幅度约 55.28%. 此外样品#2 和#3 也表现出良好的 SEY 抑制效果, 其 δ_m 分别为 1.75 和 1.39. 对比样品#1–#4 特征尺寸 (表 2) 和 SEY 曲线 (图 5(a)) 可知: 样品#1–

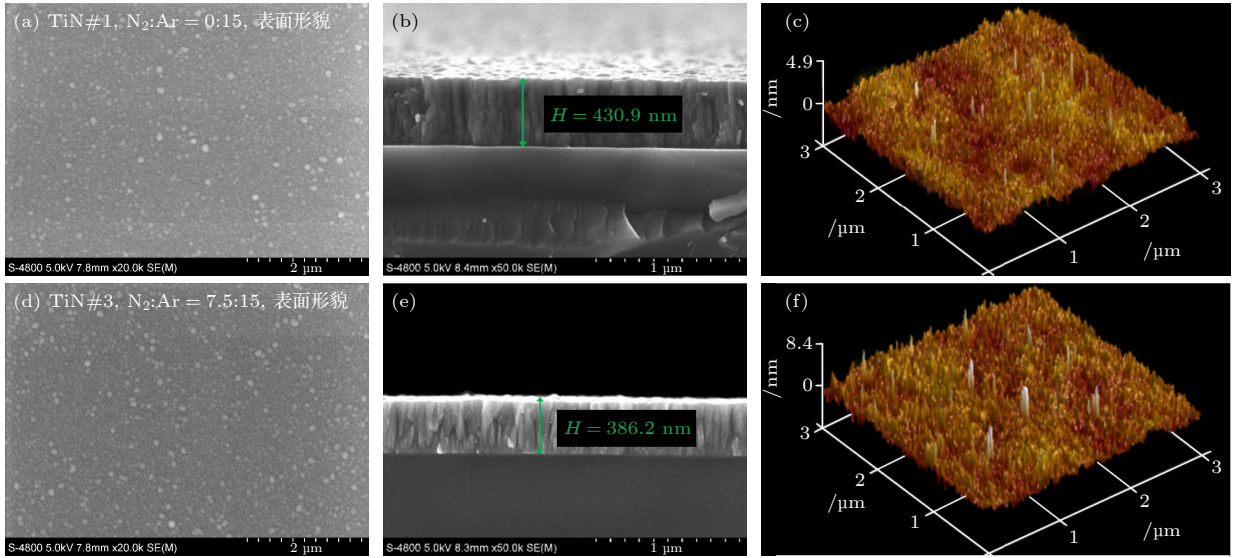


图 6 样品 TiN#1 和 TiN#3 表征结构 (a), (d) 表面形貌; (b), (e) 截面图像; (c), (f) 表面粗糙度

Fig. 6. (a), (d) Surface morphology of Sample TiN#1 and TiN#3; (b), (e) cross-section images; (c), (f) surface roughness characterized.

#4 实际孔隙比例相近但平均深度逐渐上升, 微结构表面 SEY 水平逐渐下降, 对于平均孔深较浅的样品#1 甚至在 $E_p > 1000$ eV 时表现出比未处理样品#8 更高的 SEY. 对比样品#4—#7 特征尺寸 (表 2) 和 SEY 曲线 (图 5(b)) 可知: 在微孔平均深度相近但表面孔隙比例逐渐减小的情况下, 微结构表面 SEY 水平逐渐升高, 其中样品#7 在 $E_p > 1200$ eV 时存在类似样品#1 的 SEY 增强现象. 关于样品#1 和#7 在部分能量区域增强 SEY 的现象, 可由文献 [28] 中的“边缘效应”予以解释, 简而言之: 微孔结构与未刻蚀区域相交的边缘为曲面, 该曲面结构增大了初始电子的入射极角从而增强了 SEY; 而表面微孔对于二次电子的作用则相反, 微孔结构能够增加电子与陷阱结构的碰撞概率从而限制二次电子的出射, 达到降低 SEY 的目的, 因此微结构中曲面边缘和微孔结构共同决定了微结构整体是增强 SEY 或抑制 SEY. 事实上, 曲面边缘只在微孔较浅或孔隙比例较低时有可能产生 SEY 增强作用, 一旦孔隙比例和微孔深度增大, 曲面边缘对 SEY 的影响将大幅降低.

3.3 TiN 薄膜物理特性和 SEY 测试

图 6 为样品 TiN#1 和 TiN#3 表面形貌、截面图像和表面粗糙度表征结果. 由图 6 可知: 所制备 TiN 薄膜表面相对平坦, SEM 图像显示样品表面随机分布有少量的纳米颗粒, 颗粒尺寸约为几十

纳米, AFM 测试结果表明薄膜表面的平均粗糙度小于 10 nm, 且仅在小部分区域会有凸起的颗粒. 此外由图 6(b), (e) 截面的 SEM 图像可知, 所制备的 TiN 薄膜结构致密, 样品 TiN#1 和 TiN#3 的膜厚分别为 431 nm 和 386 nm.

图 7 为 TiN 薄膜 SEY 测试结果, 5 组 TiN 薄膜均表现出低 SEY 特性, 其中 $N_2:Ar$ 流量比为 7.5:15 时所制备得到样品 TiN#3 薄膜 SEY 最低, 其 $\delta_m = 1.19$. 此外在其他气体比例情况下制备得到的 TiN 薄膜 SEY 也较低, 5 组样品中 SEY 最高的是样品 TiN#5, 其 $\delta_m = 1.32$. 结合 3.2 节激光刻蚀工艺可以预测, 若在激光刻蚀微结构氧化铝样品表面镀覆 TiN 薄膜, 有望获得更优的 SEY 抑制效果.

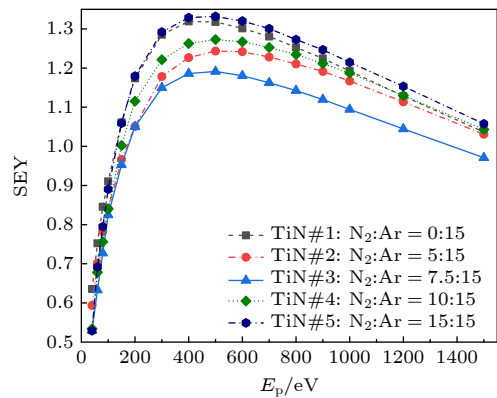


图 7 不同 $N_2:Ar$ 气体流量比下所制备 TiN 薄膜 SEY 曲线
Fig. 7. SEY curves of TiN thin film fabricated under various gas flow ratio of $N_2:Ar$.

3.4 微结构氧化铝表面镀 TiN 薄膜 SEY

图 4 中微结构氧化铝样品表面镀 TiN 膜层, 获得了具有双重 SEY 抑制效果的氧化铝. 图 8 为表面镀 TiN 薄膜后样品 #1—#8 的 SEY 曲线; 表 3 给出了各样品相应 SEY 曲线特征参数, 包括镀覆 TiN 薄膜前后样品的 δ_m 值, E_{pm} 为 δ_m 对应的 E_p 值, $\Delta\delta_m$ 为样品表面镀覆 TiN 薄膜前后 δ_m 差值. 由图 8 可知: 未经处理的原始氧化铝样品 #8 表面在镀 TiN 后 δ_m 降至 1.87, 相比未镀 TiN 膜的样品 #8 ($\delta_m = 2.46$) 有明显下降. 此外对比图 7 与图 8 可知, 所有样品在经表面微结构化和 TiN 镀膜处理后均表现出显著的 SEY 抑制特性. 对比图 8(a) 样品数据可以发现, 孔深越深, SEY 抑制程度越强; 而由图 8(b) 可知, 在微孔较深的情况下 ($h/d > 1$), SEY 主要受表面孔隙比例影响并与其呈负相关关系, 即较大的孔隙比例会导致更强的 SEY 抑制能力. 其中样品 #4 有 40 次刻蚀周期数, 孔隙比例为 67.24%, 在 $E_{pm} = 470$ eV 时 $\delta_m = 0.79$, δ_m 降幅约为 67.89%. 此外对比图 8 中镀覆 TiN 薄膜后的样品 #1, #7 和 #8 的 SEY 曲线可知, 在特定能量范围内微结构化的样品表面 SEY 依然可能高于未刻蚀样品, 说明在镀覆 TiN 薄膜

情况下曲面边缘对 SEY 的增强作用依然存在.

3.5 微结构氧化铝表面带电及抑制微放电原理分析

第 3 节氧化铝样品 SEY 曲线均在表面电中性情况下测得, 而实际情况下介质发生二次电子倍增时表面往往会产生一定量的电荷积累, 因此需要考虑表面电荷积累对放电的影响. 图 9 展示了微结构氧化铝表面抑制二次电子倍增的原理示意图. 由图 9 可知, 初级电子轰击微结构表面后, 激发的大多数第一代二次电子会受到陷阱结构影响再次与陷阱侧壁碰撞, 多次碰撞后电子大概率被表面捕获而难以出射, 仅有少部分电子能够从陷阱中逃脱. 对于微波器件而言, 所填充的氧化铝阻断了二次电子的运动空间, 二次电子倍增的必要条件从源头上得到抑制.

为了量化预测表面电荷积累对 SEY 影响程度, 采用单一能量电子束辐照诱导介质表面带电模拟方法计算样品表面电位变化动态过程. 根据文献 [29], 对于某一质地均匀的晶体材料, 电子束辐照后表面电荷积累引起的电位变化量 ΔV_s 为

$$\Delta V_s = \frac{2r\sigma}{\epsilon_0(1 + \epsilon_r)} \quad (1)$$

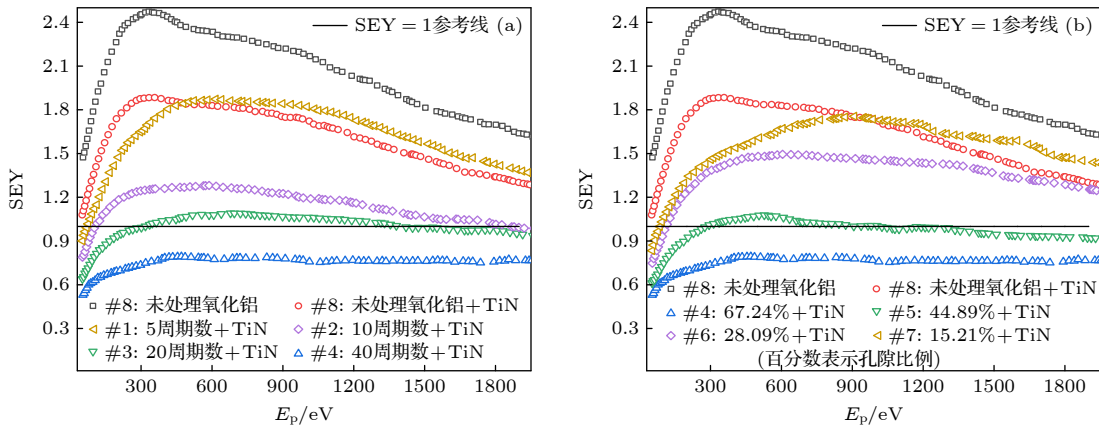


图 8 表面镀覆 TiN 薄膜的微结构氧化铝样品 SEY 曲线 (a) 样品 #1—#4; (b) 样品 #4—#7

Fig. 8. SEY curves of microstructure alumina samples coated with TiN thin film: (a) Sample #1 to #4; (b) sample #4 to #7.

表 3 微结构氧化铝样品表面镀覆 TiN 薄膜前后 SEY 特征参数统计

Table 3. Feature parameters of SEY for microstructure alumina samples with/without TiN coated.

参数	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
镀TiN δ_m	1.87	1.28	1.09	0.79	1.07	1.49	1.75	1.87
镀TiN E_{pm}/eV	615	588	694	470	528	605	908	357
无镀层 δ_m	2.12	1.75	1.39	1.10	1.50	1.70	2.09	2.46
$\Delta\delta_m$	0.25	0.47	0.30	0.31	0.43	0.21	0.34	0.59

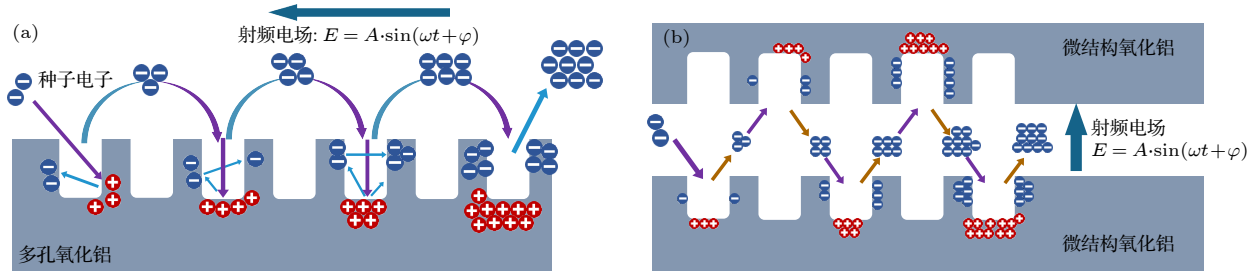


图9 微结构氧化铝表面二次电子倍增抑制示意图 (a) 单边倍增; (b) 双边倍增

Fig. 9. Schematic diagrams of suppressing multipactor for alumina surface by microstructures: (a) Unilateral multipactor; (b) bilateral multipactor.

这里, r 为电子辐照束斑半径; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为材料相对介电常数, 此处取值 7.2; σ 为表面电荷密度, 可表示为

$$\sigma = J \int (\delta - 1) dt, \quad (2)$$

其中, J 为辐照电流密度, δ 为 SEY 且是电子碰撞能量的函数, t 为辐照持续时间. 当 $\delta > 1$ 时, σ 取正值表示表面累积正电荷; 当 $\delta < 1$ 时, σ 取负值表示表面累积负电荷. 实际过程中入射电流 I_p 为已知量, 由 I_p 代换 J 可得

$$\Delta V_S = \frac{2I_p t (\delta - 1)}{\pi r \epsilon_0 (1 + \epsilon_r)}. \quad (3)$$

如果介质表面多次受到电子脉冲辐照, 则最终表面电位为各次脉冲辐照产生的 ΔV_S 代数和:

$$V_S = \sum \Delta V_S. \quad (4)$$

为计算微波器件中应用的高纯度氧化铝 (纯度 $>99\%$) 受电子辐照后的表面电位水平, 本节首先测试获得了高纯氧化铝的表面 SEY 数据. 此处选取同规格的高纯度氧化铝片 (纯度为 99.5%, 尺寸为 $8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$) 作为研究对象, 并在样品表面应用 4 种不同工艺, 即①未经处理、②表面镀 TiN 薄膜、③表面制备微结构和④表面制备微结构后镀 TiN 薄膜, 4 种工艺获得的样品分别记为 $\text{Al}_2\text{O}_3\#1$ — $\#4$. 图 10 为 4 种氧化铝样品 SEY 曲线, 其中对于样品 $\text{Al}_2\text{O}_3\#3$, 表面制备微结构后 SEY 显著降低, δ_m 由 3.58 降至 1.80, 在微结构表面镀 TiN 薄膜后, SEY 得到进一步抑制, 样品 $\text{Al}_2\text{O}_3\#4$ 的 δ_m 降至 0.98.

在已知高纯度氧化铝 SEY 数据的基础上, 可计算电子束辐照下的表面带电情况. 具体辐照参数如下: 辐照束流强度 $I_p = 1 \times 10^{-6} \text{ A}$, 束斑半径为 1 mm , 脉冲宽度为 $0.9 \times 10^{-6} \text{ s}$, 脉冲周期为 $1 \times$

10^{-6} s . 图 11 展示了电子束辐照能量 $E_p=1500 \text{ eV}$ 时, 表面电位 V_S 的变化过程. 由图 11 可知: 对于样品 $\text{Al}_2\text{O}_3\#1$ — 3 , 当电子束辐照能量 $E_p=1500 \text{ eV}$ 时, 样品 SEY 值均大于 1, 辐照后样品表面带正电, 由于表面正电位对二次电子有吸引作用, 因此大部分能量很低的二次电子无法逃逸, 被吸引回表

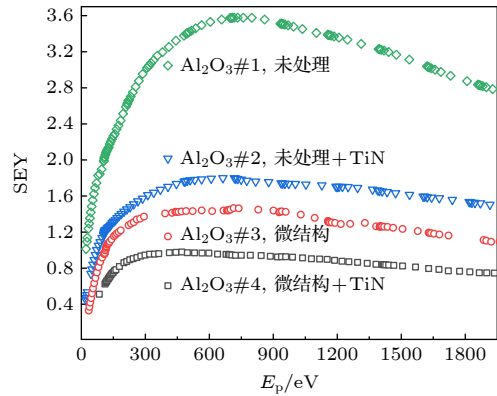


图 10 高纯度氧化铝表面应用 4 种工艺后 SEY 曲线

Fig. 10. SEY curves of highly purified alumina applied four treating technologies.

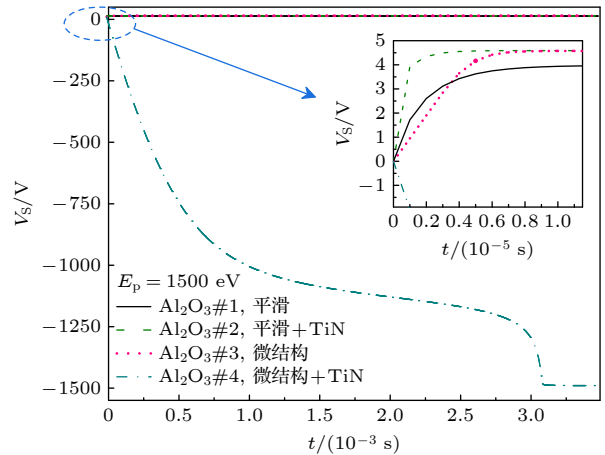


图 11 电子束辐照对表面电位 V_S 的影响

Fig. 11. Effect of electron beam irradiation on the surface potential V_S .

面后形成表面空间电荷区,使得原有的表面正电位水平略有降低.经过长时间辐照后,表面正电位通常会稳定在 10 V 以下,平衡电位低且达到平衡电位的时间较短,通常该情形下的表面充电过程几乎可忽略.对于微结构表面镀覆 TiN 的样品 $\text{Al}_2\text{O}_3\#4$, SEY 在所有能量范围内均小于 1,因此在第一个脉冲辐照后表面带负电,且随电子脉冲数增加表面负电位逐渐升高,直至表面电位达到能够使入射电子减速到 0 的某一负值,此时 V_S 最终稳定状态为 -1500 V.通常该水平的负带电不会引起氧化铝表面发生放电,但是该表面电位会对后续入射电子产生减速作用,能量小于 1500 eV 的初始电子会被减速至 0 而不能到达表面.能量高于 1500 eV 的电子达到表面后,诱发 SEE,表面电位对产生的二次电子有加速作用,并使二次电子获得 1500 eV 的额外能量.

以上讨论情形中,仅有 SEE 诱发的静电场对电子产生排斥或吸引作用,而无外加电场对电子加速或减速.然而当存在射频电场时,电子会从外加电场中额外获得能量,当电子碰撞的局部区域 $\text{SEY} > 1$ 时,电子就有可能与外加射频电场谐振,诱导微放电效应发生.对于经过表面处理的氧化铝样品,若测得 SEY 均在 1 以下,理论上不具备二次电子倍增的先决条件,无法诱发微放电.然而实际上该 SEY 测试结果是测试区域内所有微区表面 SEY 加权平均得到的 SEY 结果,不能代表某一特定微观区域内的 SEE 情况.换言之,在初始电子束流辐照的区域内,小部分区域 $\text{SEY} > 1$ 而大部分区域 $\text{SEY} < 1$,电子有可能在 $\text{SEY} > 1$ 的区域发生倍增放电,这也是在 $\text{SEY} < 1$ 的表面仍可能发生微放电的原因.

3.6 同轴低通滤波器微放电抑制实验验证

为了通过实验验证低 SEY 氧化铝表面对微放电的影响,本节应用 3.1 节仿真的同轴低通滤波器模型进行实物加工,并应用该器件实物作为微放电验证对象.器件中所加载氧化铝介质片纯度为 99.5%,尺寸为 $8\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$,加载位置为图 2 中区域#1.将所加工的器件分为 3 组,并简记为器件#1—#3,其中器件#1加载未处理的原始氧化铝片 $\text{Al}_2\text{O}_3\#1$;器件#2加载微结构氧化铝片 $\text{Al}_2\text{O}_3\#3$;器件#3加载微结构表面镀覆 TiN 的氧化铝片 $\text{Al}_2\text{O}_3\#4$.表 4 列出了 3 组器件的插入损

耗和微放电阈值测试结果,测试结果表明氧化铝表面制备微结构且镀 TiN 薄膜后,在 1.5 GHz 工作频率点处测得器件#1—#3 的插入损耗分别为 0.17, 0.18, 0.24 dB,相比于器件#1,器件#2 和 #3 的插入损耗分别增加了 0.01 dB 和 0.07 dB,该插入损耗增量在可接受范围内.在 1.5 GHz 工作频率点下对 3 组器件进行微放电阈值测试,结果如表 4 所示,器件#1—#3 的微放电阈值分别为 125, 375 和 425 W,相比于器件#1,器件#2 和 #3 的微放电阈值提升幅度分别为 4.77 dB 和 5.31 dB,表明氧化铝表面经低 SEY 工艺处理后,微放电阈值有明显提升.

表 4 器件插入损耗和微放电阈值测试结果

Table 4. Measurement results of insertion loss and multipactor threshold for the fabricated devices.

插入损耗和微放电阈值	器件#1	器件#2	器件#3	器件#4
插入损耗/dB	0.17	0.18	0.24	0.24
插入损耗增量/dB	—	0.01	0.07	0.07
微放电阈值/W	125	375	425	650
微放电阈值提升幅度/dB	—	4.77	5.31	7.16

然而与器件#2 相比,器件#3 微放电阈值提升并不明显,仅为 50 W,为此参考 3.1 节中器件的微放电特性仿真结果.由 3.1 节中仿真结果可知,图 2 中器件内部区域#2 与填充氧化铝片的区域#1 均为易发生微放电的敏感区域,其中仿真得到区域#1 和区域#2 的微放电阈值分别为 186 W 和 245 W,因此如果要提升器件的微放电阈值,则区域#2 上下表面也有必要进行相应的处理以降低表面 SEY.通过对器件#3 的区域#2 表面进行与区域#1 相同的低 SEY 处理后得到器件#4,由表 4 可知器件#4 器件微放电阈值明显提高,达到 650 W,相比于器件#1 微放电阈值提升幅度达到 7.16 dB.

4 结 论

本文应用 CST 软件仿真了同轴低通滤波器的微放电特性,仿真验证了低 SEY 表面对微放电的抑制作用;应用激光刻蚀工艺在氧化铝表面制备微结构,应用磁控溅射工艺在微结构表面镀覆 TiN 薄膜,获得了具有超低 SEY 的氧化铝表面.将低 SEY 表面处理工艺应用于填充氧化铝基片的同

轴低通滤波器中, 实现了器件微放电阈值的大幅提升. 通过研究可以得出以下结论. 1) 结合表面制备周期性微结构和表面镀覆 TiN 薄膜两种低 SEY 工艺, 能够获得 SEY 大幅降低的氧化铝表面, 其中 SEY 最低的样品其 δ_m 值仅为 0.79, 相比于未经处理氧化铝表面的 $\delta_m = 2.46$, 降幅达 67.89%. 2) SEE 导致的氧化铝表面电荷积累会影响入射电子和出射二次电子的能量, 从而影响表面 SEY 和微放电阈值, 氧化铝表面制备微结构能够降低表面正带电的速率和电势水平. 3) 将 2 种低 SEY 工艺应用于同轴滤波器中填充的氧化铝表面, 可将器件的微放电阈值由 125 W 提升至 425 W, 阈值提高 5.31 dB, 在另一微放电敏感区域应用同样的低 SEY 工艺, 器件微放电阈值提升至 650 W, 阈值提高 7.16 dB. 本研究实现了具有超低 SEY 的氧化铝表面, 并将其应用于微波器件中, 实现了同轴低通滤波器微放电阈值的大幅度提升, 对于降低微放电、电子云和沿面放电等不良效应具有重要科学意义, 同时对提高空间以及真空系统中微放电敏感表面可靠性具有重要工程应用价值.

参考文献

- [1] Michizono S, Saito Y, Fukuda S, Anami S, Hayashi K 1997 *Vacuum* **47** 625
- [2] Cummings K A, Risbud S H 2000 *J. Phys. Chem. Solids* **61** 551
- [3] Song B P, Fan Z Z, Su G Q, Mu H B, Zhang G J, Liu C L 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 271 (in Chinese) [宋佰鹏, 范壮壮, 苏国强, 穆海宝, 张冠军, 刘纯亮 2014 *强激光与粒子束* **26** 271]
- [4] Vague J, Melgarejo J C, Guglielmi M, Boria V E, Anza S, Vicente, C, Moreno M R, Taroncher M, Gimeno M B, Raboso D 2018 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **66** 3644
- [5] Cui W Z, Li Y, Zhang H T 2019 *Simulation Method of Multipactor and Its Application in Satellite Microwave Components* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) pp5-7 (in Chinese) [崔万照, 李韵, 张洪太 2019 *航天器微波部件微放电分析及其应用* (北京: 北京理工大学出版社) 第5-7页]
- [6] Dong Y, Liu Q X, Pang J, Zhou H J, Dong Z W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 037901 (in Chinese) [董焯, 刘庆想, 庞健, 周海京, 董志伟 2018 *物理学报* **67** 037901]
- [7] Raboson D 2008 *6th International Workshop on Multipactor Corona and Passive Intermodulation* Valencia, Spain, September 24-27, 2008
- [8] Hu T C, Cao M, Bao Y, Zhang Y H, Ma J Z, Cui W Z 2017 *Chinese Space Science and Technology* **37** 54 (in Chinese) [胡天存, 曹猛, 鲍艳, 张永辉, 马建中, 崔万照 2017 *中国空间科学技术* **37** 54]
- [9] Zhai Y G, Wang R, Wang H G, Lin S, Chen K, Li Y D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 353 (in Chinese) [翟永贵, 王瑞, 王洪广, 林舒, 陈坤, 李永东 2018 *物理学报* **67** 353]
- [10] Zhang N, Cui W Z, Cao M, Wang R, Hu T C 2020 *Chinese Space Science and Technology* **40** 1 (in Chinese) [张娜, 崔万照, 曹猛, 王瑞, 胡天存 2020 *中国空间科学技术* **40** 1]
- [11] Li Y, Feng G B, Xie G B, Miao G H, Li X J, Cui W Z, He Y N 2022 *High Power Laser and Particle Beams* **34** 29 (in Chinese) [李韵, 封国宝, 谢贵柏, 苗光辉, 李小军, 崔万照, 贺永宁 2022 *强激光与粒子束* **34** 29]
- [12] Vaughan J R M 1988 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **35** 1172
- [13] Michizono S 2007 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **14** 583
- [14] Song B P, Shen W W, Mu H B, Deng J B, Hao X W, Zhang G J 2013 *IEEE Trans. Plasma. Sci.* **41** 2117
- [15] Lei Y J, Xiao D Q, Tang B H 2006 *J. Chin. Ceram. Soc.* **34** 713 (in Chinese) [雷杨俊, 肖定全, 唐兵华 2006 *硅酸盐学报* **34** 713]
- [16] Suharyanto, Yamano Y, Kobayashi S, Michizono S, Saito Y 2006 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **13** 72
- [17] Cazaux J 2010 *Appl. Surf. Sci.* **257** 1002
- [18] Wang D, Ye M, Feng P, He Y N, Cui W Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 067901 (in Chinese) [王丹, 叶鸣, 冯鹏, 贺永宁, 崔万照 2019 *物理学报* **68** 067901]
- [19] Gineste T, Belhaj M, Teyssedre G, Puech J 2015 *Appl. Surf. Sci.* **359** 398
- [20] Wang D, He Y N, Cui W Z 2018 *J. Appl. Phys.* **124** 053301
- [21] Ladarola G 2014 *Ph. D. Dissertation* (Napoli: Università degli Studi di Napoli Federico II)
- [22] Fukuma H 2013 *Ecloud'12: Joint Infn-Cern-Eucard-Accnet Workshop on Electron-Cloud Effects* Isola d'Elba, Italy, June 5-9, 2013 pp27-30
- [23] Runolo G, Ruggiero F, Zimmermann F 2001 *Phys. Rev. Spec. Top-Ac* **4** 012801
- [24] Zhang H T, Dong H Y, Yang Q 2014 *Vacuum* **51** 61 (in Chinese) [张洪涛, 董海义, 杨奇 2014 *真空* **51** 61]
- [25] Michizono S, Kinbara A, Saito Y, Yamaguchi S, Anami S, Matuda N 1992 *J. Vac. Sci. Technol. A* **10** 1180
- [26] Ye M, Wang D, Li Y, He Y N, Cui W Z, Daneshmand M 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 074902
- [27] Cai Y H, Wang D, Qi K C, He Y N 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 055103
- [28] Wang D, He Y N, Ye M, Peng W B, Cui W Z 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 153302
- [29] Braga D, Poumellec B, Cannas V, Blaise G, Ren Y, Kristensen M 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 885

Secondary electron emission suppression on alumina surface and its application in multipactor suppression*

Meng Xiang-Chen¹⁾²⁾³⁾ Wang Dan^{1)†} Cai Ya-Hui¹⁾

Ye Zhen⁴⁾ He Yong-Ning¹⁾ Xu Ya-Nan⁵⁾

1) (*School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*ZhongKe Atomically Precise Manufacturing Technology Co., Ltd, Xi'an 710119, China*)

3) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

4) (*Xi'an TST Testing Technique Co., Ltd, Xi'an 710076, China*)

5) (*Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China*)

(Received 18 December 2022; revised manuscript received 7 March 2023)

Abstract

For the high-power microwave (HPM) components applied to the space environment, the seed electrons in the components may resonate with the radio-frequency electrical field and may further lead the secondary electron multiplication to occur, triggering off the phenomenon of multipactor. Multipactor deteriorates the performance of the components, and in severe circumstances, it is even possible to result in the failure of the components or the spacecraft. Alumina ceramic possesses good dielectricity, high hardness, good thermal isolation, low dielectric loss, etc., so it is widely used in HPM systems including dielectric windows, and many other microwave components. However, alumina ceramic possesses a relatively high level of secondary electron yield (SEY or δ), indicating that the devastating effect of multipactor discharge is likely to be triggered off inside the alumina-filled HPM components in the space environment. In this work, the model of alumina loaded coaxial low pass filter is simulated to verify that reducing the SEY of the alumina surface is effective and necessary to improve the multipactor threshold. After that, we use several technologies to achieve an ultralow SEY on the alumina surface. Firstly, a series of microstructures with different porosities and aspect ratios is fabricated. The results indicate that the microstructure with 67.24% porosity and 1.57 aspect ratio shows an excellent low-SEY property, which is able to suppress the SEY peak value (δ_m) of alumina from 2.46 to 1.10. Then, various process parameters are used to fabricate TiN films on silicon sheets. Experimental results indicate that the TiN film achieves the lowest δ_m of 1.19 when the gas flow ratio of $N_2:Ar$ is 7.5:15. Thereafter, we deposit TiN ceramic coating onto the laser-etched microstructure samples, and an ultralow δ_m of 0.79 is finally achieved on alumina surface. Then we implement a qualitative analysis to explore the influence of surface charge on the secondary electron emission and multipactor for the microstructured alumina surface, discuss the mechanism of low-SEY surfaces mitigating unilateral and bilateral multipactor. For verifying the actual effect of low-SEY technologies on the suppression of multipactor, we use the technologies of constructing microstructure and depositing TiN films on the alumina surface which is filled in the designed coaxial low pass filter. Finally, we obtain a significant improvement in the multipactor threshold for the filter, which increases from 125 W to 650 W, and the improvement is 7.16 dB. This work develops an effective method to reduce SEY for alumina, which is of great scientific significance in revealing the mechanism of multipactor for the dielectric-filled microwave components and also is of engineering application significance in improving the reliability of HPM components.

Keywords: secondary electron emission, alumina, multipactor, microstructure

PACS: 79.20.Hx, 73.43.Cd, 81.40.-z

DOI: 10.7498/aps.72.20222404

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62101425, 52127817), the Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2021LLRH-03), the Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, China (Grant No. 17DZ2280800), the Major Research Equipment Development Projects of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. ZDKYYQ20220007), and the Key Deployment Project of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. ZDRW-XH-2021-6).

† Corresponding author. E-mail: alexaustin@xjtu.edu.cn

氧化铝表面二次电子发射抑制及其在微放电抑制中的应用

孟祥琛 王丹 蔡亚辉 叶振 贺永宁 徐亚男

Secondary electron emission suppression on alumina surface and its application in multipactor suppression

Meng Xiang-Chen Wang Dan Cai Ya-Hui Ye Zhen He Yong-Ning Xu Ya-Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 107901 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222404

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222404>

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

激光刻蚀对镀金表面二次电子发射的有效抑制

An effective reduction on secondary electron emission yield of gold coated surfaces by laser etching

物理学报. 2019, 68(6): 067901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181547>

微米量级表面结构形貌特性对二次电子发射抑制的优化

Optimization of surface morphology with micro meter size for suppressing secondary electron emission

物理学报. 2018, 67(17): 177901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180466>

铝阳极氧化的多孔结构抑制二次电子发射的研究

Suppressing second electron yield based on porous anodic alumina

物理学报. 2018, 67(3): 037902 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172243>

电子非麦氏分布的二次电子发射磁化鞘层特性

Characteristics of non-Maxwellian magnetized sheath with secondary electron emission

物理学报. 2021, 70(24): 245201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211061>

电子的非广延分布对等离子体鞘层中二次电子发射的影响

Effects of q -nonextensive distribution of electrons on secondary electron emission in plasma sheath

物理学报. 2019, 68(18): 185204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190225>

磁控溅射铂抑制镀银表面的二次电子发射

Suppressing secondary electron emission from silver-plated surface by magnetron sputtered platinum

物理学报. 2018, 67(8): 087901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172740>