

有机介质加载微波波导中二次电子发射对器件微放电阈值的影响*

王丹^{1)†} 刘海军¹⁾ 杨博川¹⁾ 张可越²⁾ 胡天存³⁾
贺永宁¹⁾ 张国和^{1)4)5)‡}

1) (西安交通大学微电子学院, 西安 710049)

2) (西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

3) (中国空间技术研究院, 空间微波通信全国重点实验室, 西安 710100)

4) (陕西省电子器件与高端芯片重点实验室, 西安 710049)

5) (西安市微纳电子与系统集成重点实验室, 西安 710049)

(2026年1月8日收到; 2026年2月8日收到修改稿)

微放电效应是空间高功率微波系统面临的重要可靠性问题, 二次电子发射是影响微放电发生的重要物理过程. 为进一步揭示介质加载微波器件的微放电特性及其物理机制, 以聚四氟乙烯 (PTFE) 和聚酰亚胺 (PI) 填充的微波器件为研究对象, 设计了一种工作于 Ku 频段的脊波导器件. 分析了脊波导器件中微放电敏感区域表面微孔结构降低表面二次电子发射能力的物理机制, 证明在放电敏感区域介质表面构建微孔结构可有效降低二次电子产额 (SEY), 显著提升器件微放电阈值. 采用飞秒激光加工技术在 PTFE 和 PI 表面制备了周期性百微米级阵列微孔结构, SEY 测试结果表明, 微孔处理后 PTFE 的 SEY 峰值从 2.1 降至 1.4, 降幅达 33.3%, 第一临界能量 (E_{P1}) 从 40 eV 提升至 95 eV; PI 的 SEY 峰值从 1.4 降至 1.1, 降幅为 21.4%, E_{P1} 从 65 eV 显著提升至 205 eV. 微放电分析研究表明, 单脊波导中微放电敏感表面经微孔处理后, 填充 PTFE 或 PI 的器件微放电阈值分别提高至 12374 W 和 12109 W, 与未经处理的器件微放电阈值 7734 W 和 7265 W 相比, 处理后器件的微放电阈值提升约 5000 W. 研究成果为高功率微波器件中介质低 SEY 表面研究提供了思路, 在微波器件介质微放电抑制研究方面具有工程应用价值.

关键词: 微放电, 二次电子, 有机介质, 单脊波导, 微孔结构

DOI: 10.7498/aps.75.20260035

CSTR: 32037.14.aps.75.20260035

1 引言

微放电效应是当前限制空间高功率微波系统工作电平提升的重要可靠性问题之一^[1], 该现象通常发生在微波器件内部, 具体表现为: 自由电子在射频电场的持续加速下发生谐振, 通过二次电子

发射过程实现电子倍增, 进而诱发二次电子雪崩倍增, 产生放电^[2-4]. 二次电子产额 (secondary electron yield, SEY) 是衡量固体表面二次电子发射能力的核心参数, 其定义为表面激发的二次电子数与入射电子数之比^[5]. 对于空间微波系统中易于发生微放电效应的敏感表面, 其边界材料表面 SEY 较高时, 将显著增加微放电发生风险, 从而降低工

* 甘肃省集成电路制造材料创新联合体项目 (批准号: 25ZDGE004)、国家自然科学基金 (批准号: 62574162, 62401470)、中央高校基本科研业务费 (批准号: xzy012025052) 和空间微波通信全国重点实验室基金 (批准号: Y24-SYSJJ-05) 资助的课题.

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

‡ 通信作者. E-mail: zhanguohe@xjtu.edu.cn

作在空间环境中的微波器件的功率承载能力^[6-8]。为此降低典型固体表面 SEY 成为当前空间高功率微波系统微放电可靠性设计中的关键研究方向,对于涉及易于发生微放电的微波器件具有重要意义。目前,降低 SEY 的技术路线主要包括两类:一是在表面构造各类微纳结构,表面复杂微纳结构能够有效改变二次电子运动路径、增大其碰撞概率,从而显著降低 SEY^[9-12];二是通过在材料表面镀覆具有低 SEY 的功能薄膜。根据二次电子发射理论,SEY 与材料的能带结构、表面态、载流子浓度、迁移率、原子密度、内部激发电子的运动状态等均相关^[13,14],所以可以利用薄膜自身的低 SEY 特性降低表面电子发射率,典型能够用于降低 SEY 的功能镀层包括氮化钛^[15,16]、钛锆钒合金^[17,18]、碳镀层^[19]。此外类似氧化镁、氧化铝等具有高 SEY 特性的功能镀层,则在抑制空间静电放电^[20]、提升电子倍增器性能^[21,22]等方面具有广泛应用。近年来,针对金属与无机陶瓷材料的 SEY 调控方法已取得显著进展。嵌套沟槽、微孔阵列等结构被证实可有效降低金属表面 SEY,并显著提高微波器件的微放电阈值^[23-26]。2018年,胡晶等^[27]基于蒙特卡罗模拟对铜表面微结构进行研究,发现占空比和深宽比的增大均可降低 SEY,且三角形凸起结构能显著抑制二次电子发射,理论上可使 SEY 峰值下降约 60%。2020年,Ludwick 等^[28]报道了关于微孔金表面 SEY 调制研究,通过精确的实验测量和蒙特卡罗模拟,揭示了孔隙率、纵横比和入射角对 SEY 的显著影响。2023年,Brown 等^[29]提出在矩形波导表面设计嵌套沟槽结构,该结构通过改变表面几何形状影响电场分布与电子运动轨迹,从而抑制多粒子放电过程中的电荷增长,与普通波导相比,相同时间内嵌套沟槽中电荷数量增长可降低超过 280 倍。对于无机介质材料,2018年,Alvarado 等^[30]通过蒙特卡罗模拟研究了微孔六方氮化硼表面的 SEE 特性,仿真研究发现微孔结构的表面在霍尔效应推进器中可导致超过 50% 的 SEY 值降低。2023年,孟祥琛等^[31]在氧化铝基板上通过红外激光刻蚀制备具有高孔隙率(约 52%)的微米级阵列结构,可使氧化铝表面 SEY 峰值由 2.46 降低至 1.00;进一步在该表面沉积 TiN 薄膜后,SEY 可降低至 0.69,应用微孔处理结构和表面镀层双重工艺的同轴低通滤波器微放电阈值从 125 W 增至 650 W。

与无机介质相比,有机介质材料在 SEY 调控和微放电方面的研究鲜有报道。一方面,传统低

SEY 功能镀层工艺(如磁控溅射、等离子体沉积等)会需要或产生高温环境,而大部分有机材料热稳定性较差,难以直接与这类薄膜制备工艺兼容;另一方面,普通的红外激光刻蚀等常规微孔处理手段对有机材料的适配性差,易引发热损伤或结构塌陷。2019年,Berenguer 等^[32]通过在矩形波导放电边缘贴附 PTFE 薄膜,实验观察到微放电阈值略有提升。2025年,Wang 等^[33]设计具备环形放电间隙的圆同轴低通滤波器,通过对 PTFE 和 PI 聚合物加工形成环形凹槽,实现微放电阈值提升,但结果显示存在刻蚀产生的非理想结构导致微放电阈值的提升效果降低。此外,有机材料在微放电过程中表现出更为复杂的电荷积累效应,表面电荷分布的时序演变对后续的 SEY 行为与微放电阈值具有显著影响。近年来,学者们针对介质双边微放电开展了较多理论建模与数值模拟研究,研究指出表面电荷积累引起的静电场在一定条件下可导致放电自熄灭,从而可能抑制微放电效应^[34-38]。2022年,Vague 等^[39]对矩形波导和沟槽间隙波导的微放电特性进行了理论和实验研究,证实了沟槽间隙波导技术在抑制微放电方面的优越性。2023年,Zhai 等^[40]针对双面介质加载平行板波导中的微放电效应,建立射频电场、空间电荷场及介质表面电荷场的静电粒子模拟模型,研究证明由于介质表面电荷场的存在,在一定条件下器件内部会出现微放电的自熄灭现象。然而,针对有机介质表面微结构的设计、制备及其对 SEY 与双边微放电的调控机理,至今仍缺乏系统研究。因此,在当前微波器件向高频化、集成化发展的背景下,开展有机介质填充微波器件微放电研究,并探索适用于有机介质的低 SEY 表面处理技术,对于空间微波器件或系统的抗微放电设计具有重要的科学意义与工程应用价值。

Ku 波段微波器件在卫星通信、雷达系统和微波传输设备中应用广泛,且 Ku 波段下有机介质的电损耗率低,更适用高功率场景,因此本研究选取有机介质填充的 Ku 波段器件作为研究对象,探究其微放电特性对器件敏感表面 SEY 的依赖规律。设计了两种工作于 Ku 波段的单脊波导器件,器件中的介质填充物分别为聚四氟乙烯(PTFE)和聚酰亚胺(PI),脊波导器件在填充的电介质和金属之间存在 0.2 mm 的间隙,用于进行器件级微放电研究。从理论上分析了微孔结构有效降低 SEY、提升微放电阈值的物理机制,并结合微放电仿真,观察

到微放电阈值显著提升. 实验研究中采用飞秒激光加工技术构建微孔结构, 实现了 SEY 的有效抑制, 应用 SEY 测试结果进行微放电阈值仿真, 获得了脊波导器件微放电阈值显著提升的结果.

2 单脊波导器件设计与微放电仿真

2.1 PTFE 和 PI 有机介质性能分析

PTFE 和 PI 同属高性能聚合物, 但其分子结构与性能目标的根本差异, 决定了它们在实际应用中各具独特优势和局限, 具体差异见表 1. PTFE 和 PI 在当前高频与高功率微波工程中具有广泛应用及代表性: PTFE 以其极低的介电损耗, 广泛应用于高性能射频电缆、柔性电路及低损耗天线等对传输效率要求苛刻的场景; PI 凭借优异的热稳定性、机械强度及与半导体工艺的兼容性, 被大量用于高密度封装、光电集成模块以及高功率器件的基板或隔离层. 基于以上关于两类有机介质物理性质及介电性能的讨论, 本工作中选取 PTFE 和 PI 作为微波器件中的填充介质, 开展器件级介质表面微放电研究.

2.2 Ku 波段的单脊波导设计

为探究 Ku 波段介质平板间隙的微放电特性, 设计了一种工作于 Ku 波段的单脊波导结构, 器件结构如图 1 所示, 由 3 部分组成: 两端的的标准矩形波导段、中间的单脊波导阻抗过渡段以及中心电介质填充段. 微波系统中, 波导器件用于实现对电磁波的传输、模式、幅度、相位、频率等特性的调控. 相较于传统矩形波导, 单脊波导具有以下两点优势: 其一, 主模与高阶模态间更大的截止频率间隔有效降低了传输干扰; 其二, 在维持波导整体长宽尺寸不变的前提下, 通过调节纵向脊结构尺寸即可实现宽范围的阻抗调控. 图 1 所示的单脊波导是基于 WR-75 标准矩形波导改进设计的, 其中图 1(a) 设定单脊波导内腔体长度 $l = 19.05 \text{ mm}$, 宽度 $w = 9.525 \text{ mm}$, 腔内中央凸起的脊结构的宽度 $d = 8.6 \text{ mm}$, 通过在波导底部中心加载介质基片形成平板放电间隙结构, 介质基片与波导金属间保持 0.2 mm 间隙, 器件工作频率为 11.85 GHz .

设计符合工作要求的器件需要明确各段的阻抗. 对于该截面结构, 采用横向谐振法推导得到的功率电压等效阻抗 Z 如 (1) 式所示:

$$Z(\infty) = \frac{\pi\eta_0 \left(\frac{w}{l}\right) \left(\frac{d}{w}\right) \left(\frac{l}{\lambda_c}\right)}{\left(\frac{d}{w}\right) \left(\frac{w}{l}\right) \left(\frac{2ml}{\lambda_c}\right) \text{Incsc} \left(\frac{\pi d}{2w}\right) \cos^2\theta_2 + \frac{\theta_2}{2} + \frac{\sin 2\theta_2}{4} + \left(\frac{d}{w}\right) \left(\frac{\cos \theta_2}{\sin \theta_1}\right)^2 \left(\frac{\theta_1}{2} - \frac{\sin 2\theta_1}{4}\right)}. \quad (1)$$

表 1 PTFE 和 PI 材料性能对比

Table 1. Material performance comparison of PTFE and PI.

| 对比维度 | 聚四氟乙烯 (PTFE) | 聚酰亚胺 (PI) |
|--------|--|--|
| 介电性能 | 优势: 介电性能好, 介电常数和损耗角正切稳定, 是高频低损耗的基准材料 局限: 性能固化, 难以通过分子设计进行调控 | 优势: 介电性能高度可设计 局限: 本征损耗通常略高于 PTFE, 优化后的高性能品类成本较高 |
| 热性能 | 优势: 耐温范围宽, 化学稳定性极高 局限: 热膨胀系数较大 | 优势: 热稳定性强, 热膨胀系数极低 |
| 机械与加工性 | 优势: 柔韧性好, 易于制成柔性波导或电缆 局限: 黏附性差, 与基板结合力弱 | 优势: 机械强度极高, 成膜性优异 |

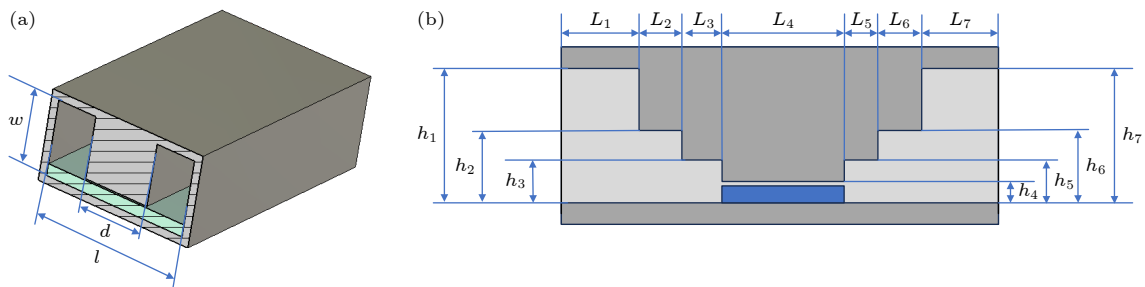


图 1 (a) 填充介质片的 Ku 波段单脊波导三维横截面图; (b) 单脊波导纵截面图

Fig. 1. (a) 3D cross-section and (b) 2D cross-section of the Ku-band single-ridge waveguide within dielectric filled.

在波导底部填充介质时, 由于结构内部媒质不均匀, 难以得到其等效阻抗的解析式. 因此, 采用仿真得到介质填充脊波导段的阻抗 Z 的变化特性. 仿真中导体脊与介质上表面的间距设置为 0.2 mm, 将介质厚度由 1 mm 逐渐增大到 3 mm, 通过仿真得到阻抗 Z 与介质片厚度的关系, 如图 2 所示. 脊波导段的等效阻抗与填充介质的厚度呈线性关系, 通过拟合得到 PTFE 与 PI 填充器件的等效阻抗 Z 与介质片厚度 h 分别符合 (2) 式和 (3) 式的关系, 后续设计中以 (2) 式和 (3) 式分别作为 PTFE 和 PI 介质填充段的等效阻抗计算依据.

$$Z = 26.58h + 8.21, \quad (2)$$

$$Z = 24.11h + 8.78. \quad (3)$$

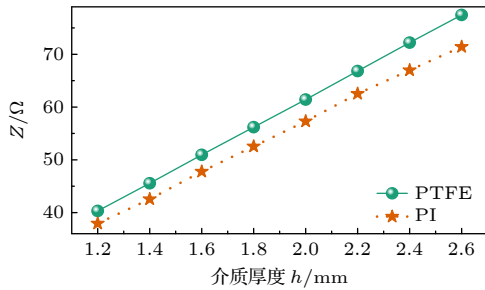


图 2 工作频率为 11.85 GHz 情况下填充段阻抗与介质片厚度的关系
Fig. 2. Relationship between the impedance of the dielectric-filled segment and the dielectric sheet thickness when the operating frequency is 11.85 GHz.

明确了波导的截面阻抗后, 在标准矩形波导段和中间的介质填充脊波导段之间加入了两节 1/4 波长阻抗变换段. 填充的有机介质的厚度为 1.5 mm, 有机介质与波导金属的间隙距离为 0.2 mm. 矩形波导的阻抗 Z 由 (4) 式决定, Z_{TE} 为对应 TE 模式的波阻抗, 式中 l 和 w 分别为矩形波导的长和宽, 如图 1(a) 中的标注所示.

$$Z = \left(\frac{2w}{l}\right) Z_{TE}. \quad (4)$$

根据切比雪夫多节匹配变换器的设计原理^[41], 可以得到中间两节脊波导的等效阻抗, 然后确定图 1(b) 中各节波导的高度 h 和长度 L . 对于填充两种不同介质的脊波导器件, 优化后各段脊波导的尺寸见表 2, 表中的节数对应图 1(b) 的波导结构中的 7 小节. 其中, 特征尺寸 h_4 为 1.7 mm, 由图 1(b) 可知, 该特征尺寸与有机介质片厚度 1.5 mm 的差值, 即为该器件中间隙最窄的部分.

表 2 PTFE 和 PI 填充脊波导阻抗变换器优化尺寸
Table 2. Optimised sizes for the PTFE-filled and PI-filled ridge waveguide impedance transformers.

| 器件类型 | 节数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|---------------|-------|------|------|-----|------|------|-------|
| PTFE填充 | L/mm | 10 | 7.3 | 5.65 | 20 | 5.65 | 7.3 | 10 |
| | h/mm | 9.525 | 7.05 | 3.05 | 1.7 | 3.05 | 7.05 | 9.525 |
| PI填充 | L/mm | 10 | 7.3 | 5.9 | 20 | 5.9 | 7.3 | 10 |
| | h/mm | 9.525 | 6.77 | 2.54 | 1.7 | 2.54 | 6.77 | 9.525 |

2.3 单脊波导电性能仿真

在 CST 软件 (Version: 2020, 中国空间技术研究院空间微波通信全国重点实验室拥有其版权) 中对尺寸优化后的两类器件进行电性能参数仿真, 得到优化后 PTFE 和 PI 填充的脊波导 S 参数 (即散射参数) 仿真结果如图 3 所示. 在工作频点 11.85 GHz 处, PTFE 填充单脊波导 S_{21} 为 -0.002 dB, PI 填充单脊波导 S_{21} 为 -0.06 dB. 以上仿真结果表明, 填充两类介质的脊波导器件中, 信号从 1 端口传输到 2 端口时的损耗非常小. 此外, 图 3 的结果表明, 两类器件的 S_{11} 均小于 -20 dB, 说明输入端口的反射很小. 以上关于器件散射参数的仿真结果表明, 所设计的两类介质填充脊波导在 11.85 GHz 工作频点处能够正常工作且信号传输性能良好. 此外, 针对所设计的脊波导器件进行了电磁场仿真, 结果如图 4 所示, 对于 PI 填充的脊波导器件, 当输入功率为 0.5 W 时, 峰值场强集中于 0.2 mm 的中间间隙区域, 且电场强度峰值为 10983 V/m, 在实际微波器件中, 电场强度最高的区域即为易于发生微波放电的敏感区域.

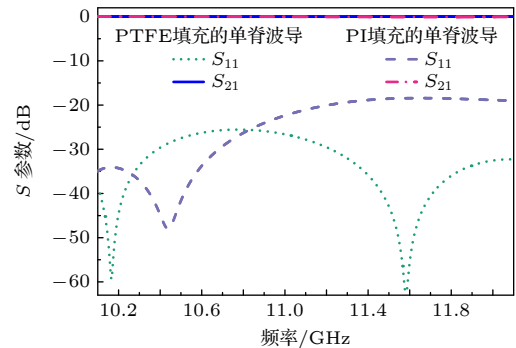


图 3 所设计 PTFE 和 PI 填充的脊波导器件 S 参数仿真结果

Fig. 3. S -parameter simulation results for the designed PTFE-filled and PI-filled ridge waveguide devices.

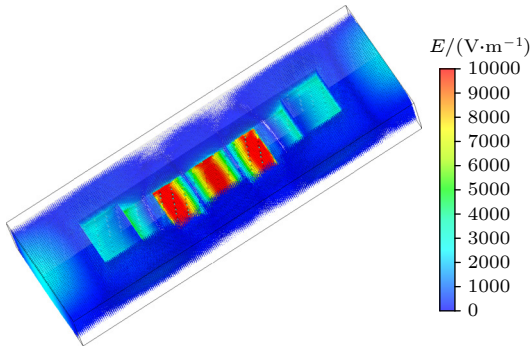


图 4 PI 填充单脊波导内部电场空间分布
Fig. 4. Spatial distribution of the electric field within the PI-filled single-ridge waveguide.

2.4 有机介质表面 SEY 测试分析

为研究脊波导器件的微放电特性, 需要知晓器件中微放电敏感表面的 SEY 数值. 本工作所研究的器件中, 敏感表面对应的 3 种边界材料分别为 PTFE, PI 和镀银铝合金. 研究过程中, 采用课题组自研的二次电子发射测试设备^[42], 应用收集极法测定原始 PTFE, PI 和镀银铝合金 3 类材料的 SEY, 测试结果如图 5 中的散点所示. 获得 SEY 测试数据后, 在 CST 软件的 SPARK3D 模块中利用 Vaughan 模型^[2]实现 SEY 数值拟合, 得到 3 种材料的 SEY 拟合曲线, 拟合结果如图 5 中曲线所示. PTFE 的 SEY 峰值 (简记为 δ_m) 为 2.1, 使得 SEY 为 1 的第一临界能量 (简记为 E_{P1}) 为 40 eV; PI 的 δ_m 为 1.4, E_{P1} 为 65 eV; 镀银铝合金的 δ_m 为 2.0, E_{P1} 为 45 eV. 从图 5 曲线整体趋势来看, 3 种材料的测试曲线与模拟曲线在峰值位置、第一临界能量

及整体变化趋势上, 均表现出与实验测试结果良好的一致性, 表明拟合结果与测试结果相匹配, 能够用于器件微放电仿真过程中的二次电子倍增过程模拟.

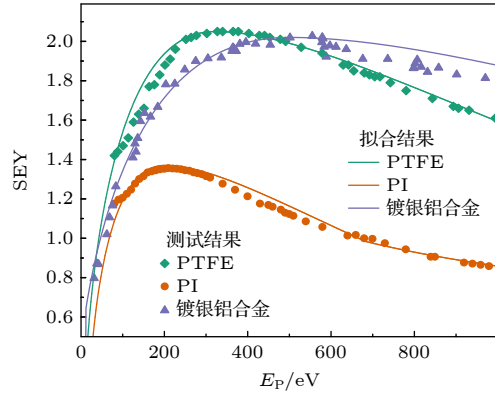


图 5 未经处理的原始 PTFE、PI 和镀银铝合金的 SEY 测试结果及拟合曲线
Fig. 5. Measured SEY results and fitted SEY curves for the untreated PTFE, PI, and silver-plated aluminum alloy.

2.5 脊波导微放电特性仿真分析

要仿真获得器件的微放电阈值, 需要将仿真得到的单脊波导模型的网格信息和电磁场分布情况导入 SPARK3D 中, 同时观察馈入微波信号后器件内部的二次电子数量的演化过程. 仿真中设置仿真频率为 11.85 GHz, 初始粒子数 3000 个, 并利用图 5 中得到的 SEY 数据设置 PTFE 和 PI 以及金属材料的 SEY 曲线, 最终获得时间变化下电子数量演化仿真结果, 如图 6 所示. PTFE 和 PI 填充的两种脊波导器件微放电阈值仿真结果分别为

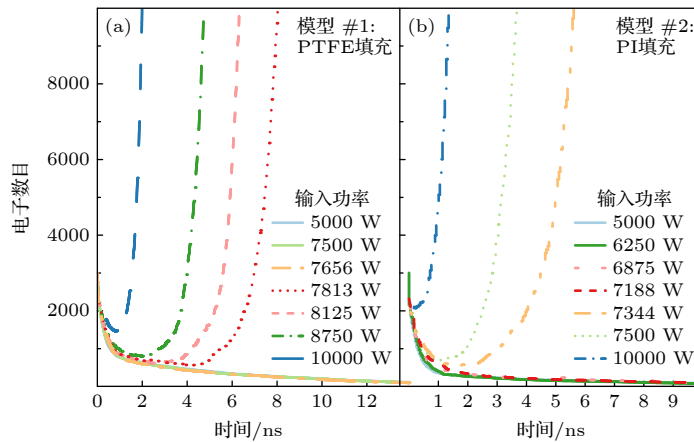


图 6 单脊波导器件在不同输入功率下电子数目的演化过程 (a) 模型 #1, 器件中填充未经处理的 PTFE; (b) 模型 #2, 器件填充未经处理的 PI

Fig. 6. Evolution of electron number in single-ridge waveguide devices under varying input power: (a) Model #1, device filled with untreated PTFE; (b) Model #2, device filled with untreated PI.

7734 W 和 7265 W. 此外, 当器件输入功率高于微放电阈值时, 电子数目在十几纳秒内发生指数型倍增, 而当器件输入功率低于微放电阈值时, 电子数目逐渐降低, 表明不会诱发电子倍增过程. 从二次电子倍增诱发微放电效应的物理机制出发可知, 材料表面较高的 SEY 会增加微放电阈值, 限制器件的工作功率.

图 6 的仿真结果显示, PTFE 填充脊波导的微放电阈值大于 PI 填充及报道的微放电阈值, 而图 5 中测得 PI 的 SEY 显著小于 PTFE 的 SEY, 这与通常情况 SEY 越小微放电阈值越大的情况相悖. 实际上, 因为不同介质材料的微放电阈值不仅与 SEY 相关, 还与二次电子的能量分布有关. 对于 PTFE 和 PI 等介质填充的单脊波导器件而言, 二次电子发射过程中产生的介质表面电荷对微放电行为有重要影响. 介质表面电荷的类型与累积水平主要受材料二次电子发射特性控制: 当入射电子能量低于第一临界能量 E_{P1} 或高于第二临界能量 E_{P2} 时, 对应的 SEY 小于 1, 电子在介质表面累积, 从而形成负表面电势; 当入射电子能量位于 E_{P1} 和 E_{P2} 之间时, 由于 SEY 大于 1, 正电荷易在介质表面聚集并形成正表面电势. 在实际微放电过程中, 射频电场驱动下的电子轰击是连续发生的, 随着碰撞次数的增加, 介质表面电荷水平不断演化, 并进一步反过来调制后续的二次电子发射过程. 带正电的介质表面不仅会加速后续入射电子, 还会吸引部分低能二次电子返回表面, 降低某些到达对面金属板电子的能量, 从而削弱表面电势的持续增长; 该过程与电荷的持续积累相互竞争, 最终使体系趋于一种动态平衡状态, 其宏观表现为介质表面的 SEY 逐渐接近 1. PTFE 的 E_{peak} 大于 PI 的 E_{peak} ,

稳态条件下的表面电位与二次电子发射特性的关系, 如 (5) 式所示^[43]:

$$\delta_0 \frac{27(2 + V_{surface}/E_{peak})}{(3 + V_{surface}/E_{peak})^3} = 1, \quad (5)$$

式中, $V_{surface}$ 为表面电位, E_{peak} 为峰值能量. 依据 (5) 式的定量分析可知, 同样的电子辐照条件下, PTFE 的正表面电位大于 PI 的正表面电位, 而逐渐积累增大的正表面电势会逐渐使得 SEY 趋近于 1 (具体分析可参考 3.3 节), 诱发自熄灭现象, 具体表现为正的表面电势会吸引部分低能二次电子返回表面, 且降低碰撞对面极板的电子能量, 减弱二次电子倍增概率, 所以这里得到 PTFE 的微放电阈值测量结果大于 PI.

3 微孔结构调控二次电子发射的理论分析与实验验证

3.1 微孔结构降低 SEY 的理论分析

微放电效应的发生与敏感表面的二次电子发射能力直接相关, 降低敏感表面的 SEY 是降低微放电效应发生风险的有效途径. 在实际的工程研究中, 通过激光刻蚀能够在固体表面形成微孔结构, 并且这类微孔结构可显著调控固体表面的二次电子发射特性. 具体来说, 周期性微孔在介质表面构建了具有特定深宽比的陷阱结构, 其几何特征直接影响二次电子在孔内的运动轨迹. 图 7 显示, 当入射电子进入微孔后, 受孔壁限制将发生多次碰撞, 每次碰撞过程会损失部分动能并改变运动方向. 陷阱结构会延长电子运动路径, 提升平均碰撞次数, 而这种几何约束效应显著增大了二次电子在逸出表面前的能量耗散概率, 导致有效逃逸电子数量随碰撞次数增加呈衰减趋势, 从而实现了 SEY 的显著降低.

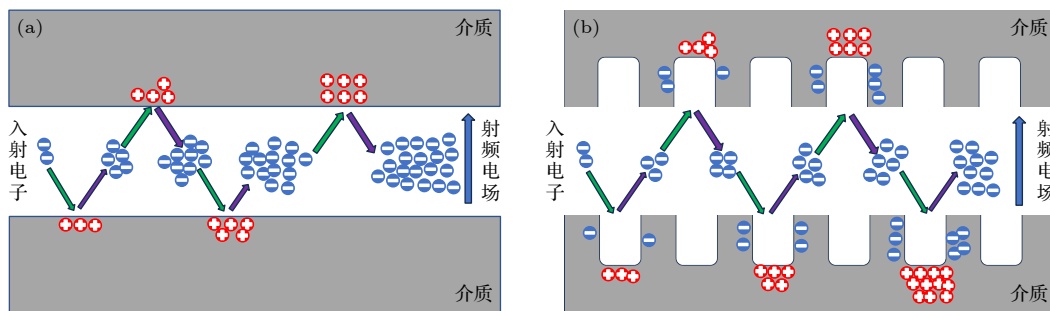


图 7 介质表面微孔处理结构抑制二次电子倍增对比示意图 (a) 平板平面介质; (b) 微孔处理介质

Fig. 7. Schematic illustrating the suppression of secondary electron multiplication by microporous surface treatment structures: (a) Flat planar dielectric; (b) microporous-treated dielectric.

3.2 有机介质表面微孔结构实现与 SEY 测试分析

图 4 中单脊波导结构的电磁场分布仿真结果显示, 在馈入微波信号后, 脊波导器件内部中心区域 0.2 mm 间隙部分的电场最强. 依据微放电效应发生的物理机制, 射频电场最强的区域是最易于发生微放电的区域, 该区域边界固体表面的 SEY 直接影响器件的微放电阈值. 针对脊波导器件中的微放电敏感区域, 需要深入研究该区域微放电阈值对表面二次电子发射水平的依赖规律. 实验过程中, 采用飞秒激光加工技术在 PTFE 和 PI 的介质板表面构建周期性微孔结构, 以实现表面 SEY 的调控. 这里首先需要考虑微孔阵列的结构和尺寸以及易于加工特性, 以保证该表面结构能够有效降低 SEY, 实现微放电阈值提升. 此处的微孔结构设计参考了文献 [44,45], 两篇文献详细研究了氧化铝微孔阵列特征尺寸对 SEY 和方同轴低通滤波器微放电阈值的影响, 并优选出了能够有效提升微放电阈值的氧化铝表面结构设计. 在参考文献 [44,45] 的基础上, 本研究的结构设计中, 设置刻蚀单元尺寸为边长 200 μm 的正方形区域, 刻蚀单元内设计

单个圆形微孔半径为 80 μm . 使用飞秒激光刻蚀获得具有周期性微孔处理结构的表面后, 使用扫描电子显微镜 (SEM, 型号 Zeiss GeminiSEM 500, 德国) 对刻蚀获得表面进行表征, 表征结果如图 8 所示. 图 8(a) 的表征结果显示, 飞秒激光刻蚀后 PTFE 表面形成近似椭圆形孔的阵列结构, 单个椭圆孔长轴的平均长度约为 162 μm 、短轴的平均长度约为 142 μm 、孔隙率 45.17%. 图 8(b) 中 PTFE 的截面表征结果显示, 所刻蚀的微孔结构呈圆柱状, 平均孔深约为 277 μm . 图 8(d) 的表征结果显示, PI 表面并未形成规则的圆形结构, 而是形成了多边形孔结构, 等效建模后可知表面该多边形阵列形成微结构孔隙率约为 56.35%; 图 8(e) 的横截面表征结果显示, PI 表面所形成微孔结构的截面呈倒置的锥形, 微孔深约为 281 μm .

对制备得到的 PTFE 和 PI 微孔处理样品表面 SEY 进行测试, 结果如图 9 所示. 对比图 5 中未经处理的原始 PTFE 和 PI 表面 SEY 测试结果, 可知经飞秒激光处理后, PTFE 样品 SEY 峰值 δ_m 从 2.1 降至 1.4, 降幅达 33.3%, 第一临界能量 E_{P1} 从 40 eV 提升至 95 eV; PI 样品的 δ_m 从 1.4 降至 1.1, 降幅 21.4%, E_{P1} 从 65 eV 显著提升至 205 eV.

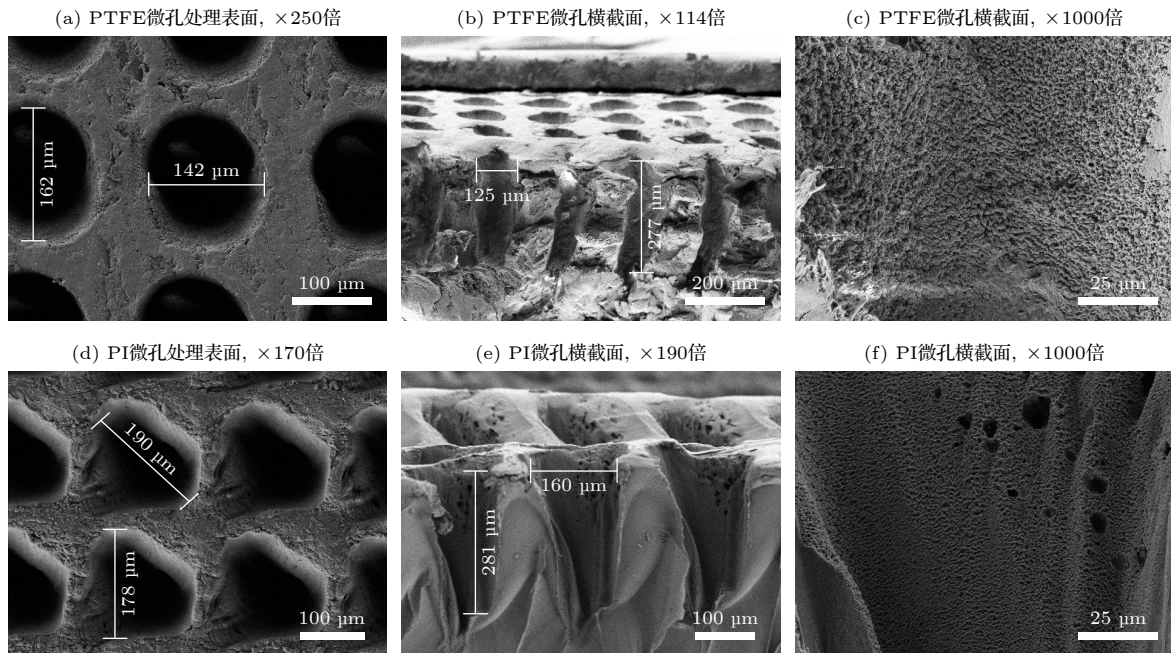


图 8 使用 SEM 表征获得的 PTFE 和 PI 表面及断裂面形貌 (a) PTFE 微孔表面; (b) PTFE 微孔断裂面; (c) 放大的 PTFE 微孔断裂面; (d) PI 微孔处理表面; (e) PI 微孔处理断裂面; (f) 放大的 PI 微孔处理断裂面

Fig. 8. Surface and fracture surfaces of PTFE and PI sheets obtained via SEM: (a) Microporous PTFE surface; (b) microporous PTFE fracture surface; (c) enlarged view of microporous PTFE fracture surface; (d) microporous PI surface; (e) microporous PI fracture surface; (f) enlarged view of microporous PI fracture surface.

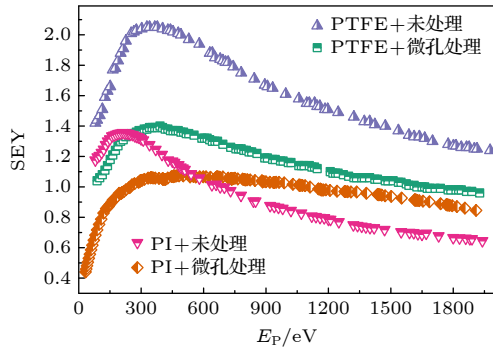


图9 飞秒激光刻蚀处理后获得的PTFE, PI微孔处理样品表面SEY曲线与原始表面SEY数值对比

Fig. 9. Comparison of surface SEY curves obtained from PTFE and PI microstructure samples after femtosecond laser etching treatment with the SEY values of the original surfaces.

3.3 外电场影响下的电子轨迹和介质SEY演化

图9的SEY测量结果表明,微孔结构可有效降低材料表面的SEY.测量采用的系统通过垂直发射固定能量的电子束至材料表面,并通过施加收集极电压捕获出射电子的方法来测量材料在无外场条件下的SEY.但在实际射频电场的工作环境下,电子在时变电场驱动下与表面发生持续相互作用,其运动行为与静态测量环境下的运动行为存在本质区别.为了定量探讨电子运动轨迹与射频电场之间的关系,给出了射频电场影响下微孔中电子的运动状态,如图10所示.图10(a)描绘了电子在微孔中未受射频电场影响时的轨迹,此时电子的运动遵循如下方程:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t, \\ y = y_0 + v_y t, \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_0 和 y_0 表示电子的初始位置, v_x 和 v_y 分别

表示在 x 和 y 方向的速度.如果施加外部射频电场,电子将受到一个随时间变化的加速场 $E(t)$ 的作用力,如图10(b)所示,这种情况下的运动方程应修正为

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t, \\ y = y_0 + \int \left(v_y + \int \frac{eE(t)}{m} dt \right) dt. \end{cases} \quad (7)$$

在无射频电场的条件下,微孔可通过几何约束增加电子与侧壁的碰撞概率,从而抑制SEY.然而在真实微波组件中,电子的运动轨迹会发生显著变化.在考虑空间电场力作用的情况下,使用蒙特卡罗方法抽样绘制多个二次电子底部出射的空间运动轨迹,如图10(c)所示,二次电子在纵向射频电场影响下持续加速,使其运动轨迹呈抛物线状.这种动态电场产生的作用,使得部分低能电子得以越过微孔侧壁而逃逸,导致动态环境下的实际SEY显著高于静态测量值.因此,在工程设计与应用时,必须充分考虑动态电场对二次电子发射行为的影响.

为了描述表面电荷的动态演变,利用脉冲电子束进行了一项定量分析,以评估在电子束照射作用下电荷的积累.此处假设电子束的照射电流 I 为 2×10^{-6} A,电子束辐照圆形区域的半径 r 设置为 $20 \mu\text{m}$,脉冲宽度 t 为 $0.9 \mu\text{s}$.对于每一次入射,使用(8)式计算表面电位^[46]:

$$V = \frac{2It(\sigma - 1)}{\epsilon_0(1 + \epsilon_r)\pi r}, \quad (8)$$

式中, σ 为总电子发射产额, ϵ_0 是真空介电常数, ϵ_r 是介质的相对介电常数.

根据电子束辐照介质表面电位计算方法^[47],得到不同脉冲个数下PTFE表面电位影响下的SEY曲线图,如图11所示.在脉冲个数为400个

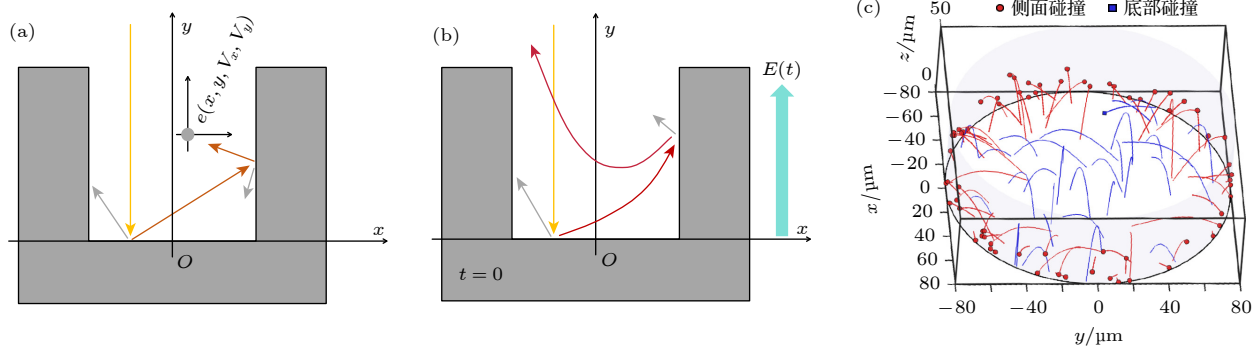


图10 二次电子运动轨迹示意图 (a) 无射频电场; (b) 有射频电场; (c) 蒙特卡罗模拟射频场对电子轨迹的影响

Fig. 10. 2D schematic of secondary electron trajectories: (a) Without RF electric field; (b) with RF electric field; (c) influence of RF fields on electron trajectories via Monte Carlo simulations.

时, PTFE 表面电荷积累导致的表面电势使得 SEY 趋近于 1, 表明此时 PTFE 表面电荷达到饱和状态. 由于这种由射频场、二次电子发射与表面电荷积累相互作用所引起的动态非线性行为, 使得介质表面微放电研究相较于金属表面更为复杂, 也构成了介质填充波导器件微放电阈值分析中的关键难点之一. 因此, 在评估介质表面微放电特性及其抑制方法时, 有必要将表面电荷积累效应与二次电子发射行为进行统一考虑.

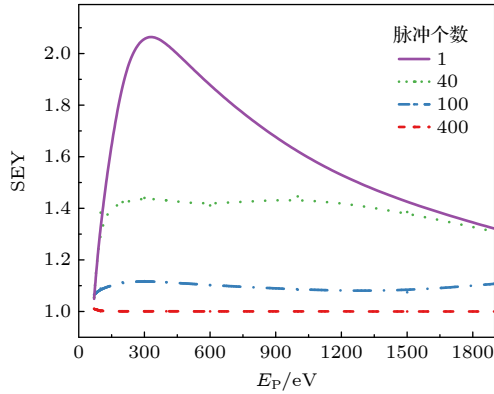


图 11 不同辐照脉冲个数下 PTFE 表面 SEY 演化规律
Fig. 11. Evolution of surface SEY on PTFE surfaces under different numbers of irradiation pulses.

3.4 脊波导器件实物电性能测试

在实际工程中, 针对局部的表面处理不应影响原始微波器件的电性能. 为了衡量介质表面制备微纳结构后器件电性能是否受到影响, 在介质表面经过 3.2 节中所述的飞秒激光处理后, 组装了两组脊波导器件实物, 器件中分别填充了表面进行微孔处理结构的 PTFE 和 PI 样品 (分别命名为器件#3 和器件#4); 同时组装了两组填充原始未经处理 PTFE 和 PI 介质片的脊波导器件 (分别命名为器件#1 和器件#2) 进行对比. 图 12 展示了 4 组单脊波导器件的 S 参数测试结果, 结果表明器件的反射与传输特性均满足设计要求: 在工作频点 11.85 GHz 处, 未处理 PTFE 填充的器件#1 与表面处理后的 PTFE 填充器件#3 的 S_{21} 分别为 -0.22 dB 和 -0.10 dB; 未处理 PI 填充器件#2 与表面处理后的 PI 填充器件#4 的 S_{21} 分别为 -0.44 dB 和 -0.37 dB. S 参数测试结果表明所有器件在工作频点处的损耗都非常小, 满足信号传输需求, 且 PTFE 和 PI 经过微孔处理后, 器件的插入损耗反而降低. 此外, 图 12 中的测试结果还显示, 4 组器件的反射参数

S_{11} 均小于 -20 dB, 表明端口的反射损耗非常小. 图 12 中的测试数据表明, 使用飞秒激光刻蚀工艺在 PTFE 和 PI 表面进行微孔处理, 对脊波导器件的微波传输和反射性能影响非常小, 脊波导器件中的介质 PTFE 和 PI 在经过激光刻蚀后, 器件整体的电性能依然满足工作要求.

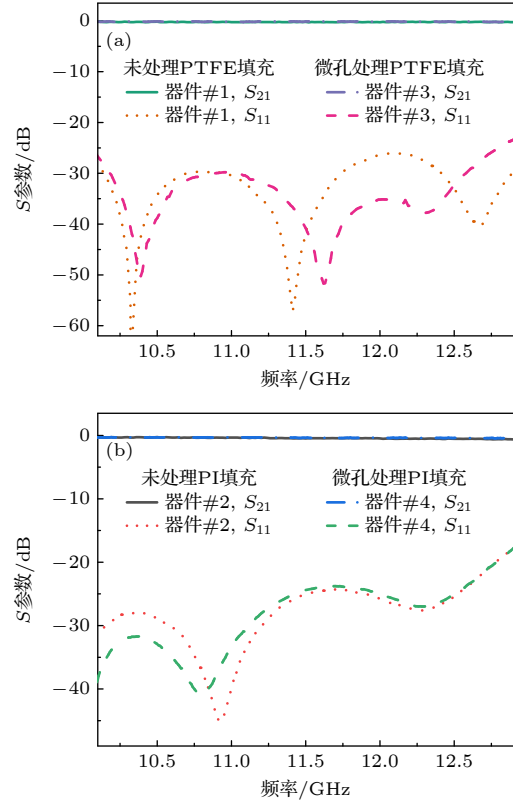


图 12 4 组脊波导器件的 S 参数测试结果 (a) 填充 PTFE 的脊波导; (b) 填充 PI 的脊波导
Fig. 12. S -parameter test results for four sets of ridge waveguide devices: (a) Ridge waveguide filled with PTFE; (b) ridge waveguide filled with PI.

3.5 填充件处理后的脊波导器件微放电仿真

在 CST 仿真软件中, 对脊波导重新建模, 在 PTFE 和 PI 填充的介质表面建立实验获得的微孔结构, 并进行器件性能仿真, 将仿真得到的脊波导模型 (进行表面微孔处理的 PTFE 和 PI 填充的单脊波导) 的网络信息和电磁场分布情况导入 SPARK3D 中来观察微放电抑制效果. 仿真中设置仿真频率为 11.85 GHz, 初始粒子数 3000 个, 并利用图 5 中得到的 SEY 数据设置 PTFE 和 PI 填充介质以及金属材料的 SEY 曲线. 脊波导器件中微放电敏感表面引入微孔处理的结构后, 电子数量演化趋势仿真结果如图 13 所示. PTFE 和 PI 介质表面经过处

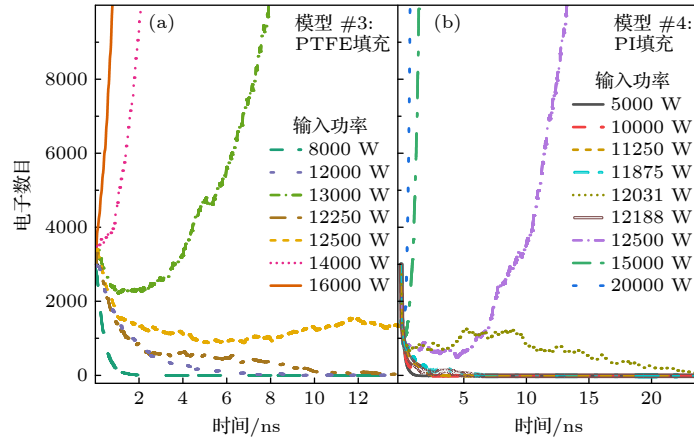


图 13 单脊波导组件模型在不同输入功率下电子数量的演变 (a) 模型#3, 器件中填充微孔处理的 PTFE; (b) 模型#4, 填充微孔处理的 PI

Fig. 13. Simulated evolution of electron number in single-ridge waveguide assembly models under varying input power: (a) Model #3, device filled with microporous-treated PTFE; (b) Model #4, device filled with microporous-treated PI.

理使得表面 SEY 降低后, PTFE 和 PI 填充脊波导器件微放电阈值分别为 12374 W 和 12109 W, 相比于原始器件的 7734 W 和 7265 W, 分别提升了 4640 W 和 4844 W, 提升幅度分别为 2.04 dB 和 2.22 dB. 对比图 6 和图 13 的仿真结果可知: 微孔处理的 PTFE 和 PI 单脊波导的微放电阈值得到了明显的提升, 表明通过表面处理改变介质的表面形貌实现 SEY 抑制后, 能够显著提升器件的微放电阈值.

4 结 论

本文仿真研究了有机介质填充单脊波导微波器件的微放电特性, 验证了在有机介质表面实现微孔处理的结构能够降低 SEY 并实现对器件微放电的抑制作用. 所设计单脊波导滤波器中心频率为 11.85 GHz, 具备良好的通带特性与带外抑制能力. 该微波器件在金属与介质板之间存在 0.2 mm 间隙, 选用 PTFE 和 PI 两种介质材料填充, 同时采用飞秒激光刻蚀技术, 在聚合物表面构建周期性微孔结构. 实验获得的 PTFE 圆柱形微孔及 PI 倒锥形结构通过延长电子运动路径, 提升平均碰撞次数. 对于 PTFE 填充的脊波导器件, 飞秒激光处理后, PTFE 表面形成的微孔处理的结构将原始表面的 SEY 峰值从 2.1 降低到 1.4, SEY 曲线的 E_{P1} 值从 40 eV 提升到 95 eV, 使得填充 PTFE 器件的脊波导器件放电阈值从 7734 W 提升到 12374 W, 提升幅度为 2.04 dB. 对于 PI 填充的脊波导器件, 同样获得了 SEY 显著降低和微放电阈值显著提升的

结果, SEY 峰值从 1.4 降低到 1.1, SEY 曲线的 E_{P1} 值从 65 eV 提升到 205 eV, 微放电阈值从 7265 W 提升到 12109 W, 提升幅度为 2.22 dB. 本研究实现了有机介质填充脊波导器件的微放电阈值的提升, 对聚合物填充微波器件抗微放电设计研究有参考意义与工程应用价值.

参考文献

- [1] Raboson D 2008 *6th International Workshop on Multipactor Corona and Passive Intermodulation* Valencia, Spain, September 24–27, 2008 p1
- [2] Vaughan J R M 1988 *IEEE Trans. Electron Dev.* **35** 1172
- [3] Michizono S, Saito Y, Fukuda S, Hayashi K, Anami S 1996 *Vacuum* **47** 625
- [4] Kishek R A, Lau Y Y, Ang L K, Valfells A, Gilgenbach R M 1998 *Phys. Plasma* **5** 2120
- [5] Seiler H 1983 *J. Appl. Phys.* **54** R1
- [6] Semenov V E, Rakova E I, Anderson D, Lisak M, Puech J 2007 *Phys. Plasma* **14** 033501
- [7] Wong P Y, Lau Y Y, Zhang P, Jordan N, Gilgenbach R M, Verboncoeur J 2019 *Phys. Plasma* **26** 112114
- [8] Hueso J, Vicente C, Gimeno B, Boria V E, Marini S, Taroncher M 2010 *IEEE Trans. Electron Dev.* **57** 3508
- [9] Wang C, Yang Y L, Shi X R, Li W D, Sun G Y, Chen S L, Ran S L, Zhang G J, Chen Z Q 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 121601
- [10] Nistor V, González L A, Aguilera L, Montero I, Galán L, Wochner U, Raboso D 2014 *Appl. Surf. Sci.* **315** 445
- [11] Valizadeh R, Malyshev O B, Wang S H, Zolotovskaya S A, Gillespie W A, Abdolvand A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 231605
- [12] Wang C, Chen Z Q, Yang Y L, Chen S L, Shi X R, Jin X, Yang X, Ran S L, Sun G Y, Zhang G J 2024 *High Volt.* **10** 1593
- [13] Lian Z X, Zhu X P, Wang D, Meng X C, He Y N 2024 *J. Phys. D Appl. Phys.* **57** 125302
- [14] Dionne G F 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 5361

- [15] Michizono S, Kinbara A, Saito Y, Yamaguchi S, Anami S, Matuda N 1992 *J. Vac. Sci. Technol. A* **10** 1180
- [16] Lian Z X, Xu Y N, Meng X C, Wang D, Chen J X, Qi K C, He Y N 2024 *J. Phys. D Appl. Phys.* **57** 315304
- [17] Henrist B, Hilleret N, Scheuerlein C, Taborelli M 2001 *Appl. Surf. Sci.* **172** 95
- [18] Le Pimpec F, Kirby R E, King F K, Pivi M 2006 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **564** 44
- [19] Pinto P C, Calatroni S, Neupert H, Letant-Delrieux D, Edwards P, Chiggiato P, Taborelli M, Vollenberg W, Yin-Vallgren C, Colaux J L, Lucas S 2013 *Vacuum* **98** 29
- [20] Lian Z X, Yao K W, Wang D, Zhang K Y, Wang R, He Y N 2025 *Vacuum* **138** 114270
- [21] Li W Q, Zhou N, Lian Z X, Wang S Z, Wang D, Zhang G H 2025 *Vacuum* **241** 114703
- [22] Lian Z X, Wang D, Zhu X P, He Y N 2025 *J. Phys. D Appl. Phys.* **58** 115106
- [23] Pivi M, King F K, Kirby R E, Raubenheimer T O, Stupakov G, Le Pimpec F 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 104904
- [24] Troncoso G, Garcia-Martin, J M, Gonzalez M U, Morales C, Fernandez-Castro M, Soler-Morala J, Galan L, Soriano L 2020 *Appl. Surf. Sci.* **526** 146699
- [25] Benedicto J, Rius E, Bonizec A, Favennec J F, Bernal A B, Martin-Guennou A 2024 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **72** 4229
- [26] Langellotti S V, Brusstar A, Jordan N M, Lau Y Y, Gilgenbach R M 2023 *IEEE Trans. Electron Dev.* **70** 5871
- [27] Hu J, Cao M, Li Y D, Lin S, Xia N 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 177901 (in Chinese) [胡晶, 曹猛, 李永东, 林舒, 夏宁 2018 物理学报 **67** 177901]
- [28] Ludwick J, Iqbal A, Gortat D, Cook J D, Cahay M, Zhang P, Back T C, Fairchild S, Sparkes M, O'neill W 2020 *J. Vac. Sci. Technol. B* **38** 054001
- [29] Brown M, Milestone W, Joshi R P 2022 *J. Appl. Phys.* **132** 213304
- [30] Alvarado A, Chang H Y, Nadvornick W, Ghoniem N, Marian J 2019 *Appl. Surf. Sci.* **478** 142
- [31] Meng X C, Wang D, Cai Y H, Ye Z, He Y N, Xu Y N 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 107901 (in Chinese) [孟祥琛, 王丹, 蔡亚辉, 叶振, 贺永宁, 徐亚男 2023 物理学报 **72** 107901]
- [32] Berenguer A, Coves A, Gimeno B, Bronchalo E, Boria V E 2019 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **29** 595
- [33] Wang J L, Meng X C, Liu H J, Lian Z X, Yao K W, Li J L, Li R B, Zhang G H, Wang D 2025 *IEEE Tran. Microw. Theory* **73** 8415
- [34] Zhang X, Yu Q Q, Ni X R 2022 *IEEE Trans. Electron Dev.* **69** 748
- [35] Zhai Y G, Wang R, Wang H G, Lin S, Chen K, Li Y D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 157901 (in Chinese) [翟永贵, 王瑞, 王洪广, 林舒, 陈坤, 李永东 2018 物理学报 **67** 157901]
- [36] Dong Y, Liu Q X, Pang J, Zhou H J, Dong Z W 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 207901 (in Chinese) [董焯, 刘庆想, 庞健, 周海京, 董志伟 2017 物理学报 **66** 207901]
- [37] 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]
- [38] Zhang X, Wang T, Hu Q Q 2024 *IEEE Trans. Electron Dev.* **71** 2669
- [39] Vague J J, Asensio I, Coves A, San Blas A A, Reglero M, Pantaleoni A V, Raboso D, Baquero-Escudero M, Boria V E 2022 *IEEE Tran. Microw. Theory* **70** 2566
- [40] Zhai Y G, Wang H G, Cao M, Lin S, Peng M, Li Y, Cui W Z, Li Y D, Wang R 2023 *IEEE Trans. Electron Dev.* **70** 2897
- [41] Pozar D M 2012 *Microwave Engineering* (4th Ed.) (Hoboken: Wiley) pp319-326
- [42] Cai Y H, Wang D, Qi K C, He Y N 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 055103
- [43] Weng M, Xie S Y, Yin M, Cao M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 087901 (in Chinese) [翁明, 谢少毅, 殷明, 曹猛 2020 物理学报 **69** 087901]
- [44] Wang D, Mao Z S, Ye Z, Cai Y H, Li Y, He Y N, Qi K C, Xu Y N, Jia Q Q 2022 *J. Phys. D Appl. Phys.* **55** 455301
- [45] Shi J C, Zhao Y C, Zhou W X, Sun B C, Zhang J B, Wang D L, Liu Y, Sun T, Zhang X T, Tie W H 2023 *Appl. Sci. Basel* **13** 8586
- [46] Zarbout K, Ahmed A S, Moya G, Bernardini J, Goerriot D, Kallel A 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 054107
- [47] Wang J Y, Xu Y N, Lian Z X, Wang D, Meng X C, Zhou N, He Y N 2024 *Results Phys.* **57** 107339

Impact of secondary electron emission on multipactor threshold in microwave waveguides loaded with organic dielectrics*

WANG Dan^{1)†} LIU Haijun¹⁾ YANG Bochuan¹⁾ ZHANG Keyue²⁾
 HU Tiancun³⁾ HE Yongning¹⁾ ZHANG Guohe^{1)4)5)‡}

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

2) (*School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China*)

3) (*National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China*)

4) (*Shaanxi Key Laboratory for Electronic Devices and Advanced Chips, Xi'an 710049, China*)

5) (*The Key Lab of Micro-nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an 710049, China*)

(Received 8 January 2026; revised manuscript received 8 February 2026)

Abstract

Multipactor is a critical reliability issue in space high-power microwave systems caused by secondary electron emission (SEE) avalanche. This effect degrades the performance of microwave component, or even cause failure of spacecraft in severe cases. Dielectric-filled microwave components, known for their high Q factor, low loss, and ease of miniaturization, are increasingly employed in space microwave systems. However, introducing dielectric in microwave components makes multipactor evolution more complexity since SEE process induces charge accumulation on dielectric surface and further affects the electron trajectory. In this work, by taking microwave ridge waveguide devices filled with polytetrafluoroethylene (PTFE) and polyimide (PI) as the research objects, we conducted device design, modeling, and multipactor evolution research. The physical mechanism of SEE avalanche for the dielectric microporous structures was analyzed. The theoretical results demonstrated that constructing microporous structures on the dielectric surface can effectively reduce the SEE yield (SEY) and significantly enhance the device's multipactor threshold. Then periodic microporous arrays were fabricated on PTFE and PI surfaces using femtosecond laser processing. SEY testing results showed that after constructing surface microporous, the peak SEY of PTFE decreased from 2.1 to 1.4, a reduction of 33.3%, while the first crossover energy (E_{P1}) increased from 40 eV to 95 eV. And for PI, after constructing surface microporous, the peak SEY decreased from 1.4 to 1.1, a reduction of 21.4%, and E_{P1} significantly increased from 65 eV to 205 eV. The microporous structure raised the multipactor thresholds of PTFE- and PI-filled single-ridge waveguides to 12374 W and 12109 W, respectively, representing an improvement of approximately 5000 W compared to original devices' multipactor thresholds of 7734 W and 7265 W. This research provides an effective approach for microstructural treatment of dielectric surfaces in high-power microwave devices, and holds significant engineering application value for anti-multipactor designs in various microwave systems.

Keywords: multipactor, secondary electron, organic dielectric, single-ridge waveguide, microporous structure

DOI: [10.7498/aps.75.20260035](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260035)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260035](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260035)

* Project supported by the Integrated Circuit Manufacturing Materials Innovation Consortium Project of Gansu Province, China (Grant No. 25ZDGE004), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62574162, 62401470), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. xzy012025052), and the Foundation by the National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China (Grant No. Y24-SYSJJ-05).

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

‡ Corresponding author. E-mail: zhangguohe@xjtu.edu.cn



有机介质加载微波波导中二次电子发射对器件微放电阈值的影响

王丹 刘海军 杨博川 张可越 胡天存 贺永宁 张国和

Impact of secondary electron emission on multipactor threshold in microwave waveguides loaded with organic dielectrics

WANG Dan LIU Haijun YANG Bochuan ZHANG Keyue HU Tiancun HE Yongning ZHANG Guohe

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100201 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260035

CSTR: 32037.14.aps.75.20260035

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260035>

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

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

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

物理学报. 2023, 72(10): 107901 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222404>

体空位缺陷对氧化铝二次电子发射特性的影响分析

Analysis of effect of bulk vacancy defect on secondary electron emission characteristics of Al_2O_3

物理学报. 2024, 73(15): 157902 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240577>

超低频/射频联合驱动容性耦合等离子体中二次电子效应的模拟

Numerical investigation of the secondary electron effect in capacitively coupled plasmas driven by ultra-low frequency/radio frequency sources

物理学报. 2025, 74(13): 135203 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250341>

非晶态碳薄膜对金属二次电子发射的影响

Effect of amorphous carbon film on secondary electron emission of metal

物理学报. 2024, 73(4): 047901 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231604>

低能电子在玻璃管中的稳定传输

Stable transmission of low energy electrons in glass tube with outer surface grounded conductively shielding

物理学报. 2022, 71(7): 074101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212036>

110 GHz微波输出窗内表面次级电子倍增特性的电磁粒子模拟

Electromagnetic particle simulation of secondary electron multipactor characteristics in inner surface of 110 GHz microwave output window

物理学报. 2023, 72(9): 095202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222235>