



·高功率微波技术·

空间电荷和介质表面电荷对微放电演化过程的影响

王新波¹, 申发中², 于 明³, 崔万照¹

(1. 西安空间无线电技术研究所 空间微波技术重点实验室, 西安 710100; 2. 郑州大学 物理学院, 郑州 450001;
3. 南方科技大学 深圳市电磁信息重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘 要: 微放电是制约航天器微波部件功率容量的主要瓶颈之一。以介质微波部件中典型的介质加载平行板波导为例, 基于三维粒子模拟分别对仅考虑外加微波场(情况 1)、考虑外加微波场和空间电荷(情况 2)以及考虑外加微波场、空间电荷和介质表面电荷(情况 3)三种情况下微放电演化过程中电子数目、瞬态二次电子发射系数、归一化反射波电压以及介质表面与上金属板之间的间隙电压随时间的变化进行了仿真, 并给出了情况 3 电子分布和介质表面电荷密度随时间的变化过程。在此基础上, 明确了空间电荷和介质表面电荷在微放电过程中所起的不同作用: 即空间电荷会使微放电达到饱和状态, 介质表面电荷则导致微放电饱和状态无法持续, 最后自行熄灭。介质表面电荷导致了微放电过程中介质和金属瞬态二次电子发射系数下降速率不一致, 归一化反射波电压幅度随时间变化的包络类似于“眼睛”形状、间隙电压类直流偏置、非对称电子能量分布等特殊现象。

关键词: 微放电; 空间电荷; 介质表面电荷; 粒子模拟

中图分类号: O462.2

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220324

Impacts of space and dielectric surface charges on evolution of multipactors

Wang Xinbo¹, Shen Fazhong², Yu Ming³, Cui Wanzhao¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China;
2. School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3. Shenzhen Key Laboratory of EM Information, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Multipactor is one of the bottlenecks for spaceborne high-power microwave components. In this work, based on 3D particle-in-cell simulation, we investigate the fluctuation of number of electrons, the instantaneous secondary electron yield, the normalized reflection wave voltage and the gap voltage between the dielectric surface and metallic plate in the evolution of multipactors with parallel-plate dielectric-loaded waveguide for three cases: just considering external microwave field (case 1), considering both external microwave field and space charge (case 2), and considering external microwave field, space charge and surface charge on the dielectric (case 3). The electron distribution and charge density on the surface of dielectric versus time for case 3 are given. Simulation results reveal the roles of space charge and surface charge on the dielectric: space charge results in the saturation state of the multipactor, while surface charge on the dielectric results in an unsustainability of the saturation, extinguishing the multipactor. The existence of surface charge on the dielectric is responsible for the special circumstances including the different decreasing rate of instantaneous secondary electron yield of dielectric and metal plate, the eye-like shape of envelope of the normalized reflective wave voltage amplitude, the gap-voltage DC-like bias, and the unsymmetrical distribution of the energy of electrons.

Key words: multipactor, space charge, surface charge on the dielectric, particle-in-cell simulation

* 收稿日期: 2022-10-08; 修订日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61801376, 51827809); 空间微波技术重点实验室稳定支持基金项目 (2020SSFNKLSMT-02); 深圳市电磁信息重点实验室基金项目 (ZDSYS20210709113201005)

联系方式: 王新波, xinbof@163.com。

通信作者: 崔万照, cuiwanzhao@126.com。

微放电又称二次电子倍增效应^[1-2],是指真空中的电子在大功率微波场的加速下撞击微波部件内部表面,引发二次电子倍增,并最终形成电子雪崩击穿的物理现象。微放电在滤波器、双工器、环形器、微波开关等航天器大功率微波部件中极易发生,能够导致信号传输恶化,影响航天器在轨安全运行,严重时会使部件表面出气、引发气体电离放电从而烧毁微波部件表面,导致航天器功能失效^[3-5]。因此,微放电研究一直受到国际宇航领域的高度关注。

近年来,为了减小微波部件的体积和重量,介质在空间大功率微波部件中被广泛采用^[6-7]。不同于金属,介质具有绝缘特性,当电子撞击介质时,会在介质表面带电,所带电荷的极性由发射电子与入射电子数量的相对关系决定并且在每次撞击后其电荷量会相应改变^[8-10]。与外加微波场的交流特性不同,介质表面电荷产生的电场具有直流特性,又由于其幅度在每次碰撞后会发生改变,称其为类直流电场^[11]。

介质加载平行板波导在准 TEM 或 TE 模的微波部件中经常碰到,是进行介质微放电研究的常用模型^[12-14]。在该结构中,类直流电场和外加微波场均垂直于介质表面,共同作用于运动中的电子。2006 年西班牙瓦伦西亚理工大学的 V. E. Boria 等人采用单电子模型对介质加载平行板波导中微放电演化过程进行了研究,提出了一种介质表面带负电的自熄灭(turning off)机制^[12];2008 年,在之前模型的基础上,该团队采用单电子薄片模拟空间电荷效应,采用多等效电子模型仿真了介质微放电的演化过程,指出类直流电场会导致微放电自行熄灭,而空间电荷效应将减缓其熄灭的过程^[13],但在计算电子薄片和介质表面电荷所产生的电场时未考虑其在金属板上的感应电荷。2014 年, A. L. Sounas 等人^[15-17]采用单电子薄片模拟空间电荷效应,考虑了电子薄片和介质表面电荷在金属板上产生的感应电荷,指出了微放电从起始到饱和转变的主要机制是电子薄片的感应电荷,并进一步指出,在激励电压较小时,介质表面电荷会使微放电熄灭;而在激励电压较大时,电子薄片的感应电荷的影响更为显著,微放电保持振荡饱和状态。但是所采用的单电子方法假设所有电子以相同的速度一起移动,构成电子薄片,未考虑出射电子速度和角度的统计特性以及电子之间的库仑斥力,而随着电子数目的增加,电子之间的斥力将使得其分布展宽,单电子模型无法有效描述这一特性。2018 年,翟永贵^[18]等人采用自主研发的粒子模拟软件仿真了介质加载平行板波导的微放电演化过程,但其忽略了空间电荷效应。

针对以上缺点和不足,本文拟采用基于粒子模拟(Particle-in-Cell, PIC)的商业仿真软件 CST Particle Studio^[19]对介质加载平行板波导的微放电过程进行仿真研究,首先,获得仅考虑外加微波场(情况 1)、考虑外加微波场和空间电荷(情况 2)以及考虑外加微波场、空间电荷和介质表面电荷(情况 3)三种情况下空间电子数目的演化过程,对三种情况的瞬态二次电子发射系数、端口归一化反射波电压以及介质表面与上金属板之间的间隙电压进行仿真和分析,明确了空间电荷和介质表面电荷在电子演化过程中的作用。其次,重点仿真了情况 3 电子分布和介质表面电荷密度随时间的变化过程,直观展示了介质加载平行板波导中微放电的熄灭过程和介质表面的持续带电特性。最后,对情况 2 和情况 3 电子能量的空间分布进行了仿真,指出介质表面电荷产生的类直流电场导致了相邻半微波周期电子能量空间分布的非对称特性。该研究工作将对航天器介质微波部件微放电设计及测试提供理论指导。

1 仿真模型及相关参数

图 1 为介质加载平行板波导理论模型,外加电压 $V_{rf}(t)$ 加载于两金属板,在两金属平行板之间产生垂直于介质表面的微波场,在微波场的作用下电子在介质和上金属板之间的真空区域内运动,当电子撞击到金属或介质表面时会产生二次电子。由于介质的绝缘特性,当电子撞击到介质表面时,产生二次电子的同时会使介质表面带电,从而产生类直流电场。随着电子数目的增加,电子之间的库仑斥力以及在金属板上产生的感应电荷的影响逐渐增大。因此介质加载平行板波导中电子的运动受外加微波场、空间电荷场和介质表面电荷产生的类直流电场的叠加作用。图 1 中介质板的厚度为 h ,相对介电常数为 ϵ_r ,真空区域的厚度为 d 。真空区域微波场的电场强度 $E_{rf}(t)$ 为

$$E_{rf}(t) = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r d + h} V_{rf}(t) \quad (1)$$

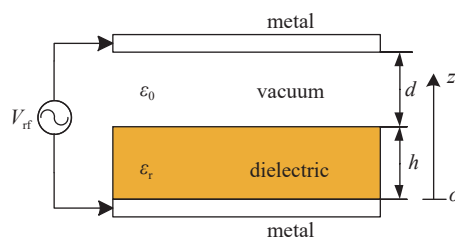


Fig. 1 Model of a parallel-plate waveguide loaded by a single dielectric layer

图 1 介质加载平行板波导模型

本文的仿真模型如图 2(a) 所示, 沿着+z 方向依次为下金属板、介质、真空和上金属板, 上下金属板的厚度分别为 2 mm, 介质的厚度 $h=1$ mm, 介质的相对介电常数 $\epsilon_r=2.1$, 真空区域的厚度 $d=1$ mm, 金属、介质和真空在 x 和 y 方向上长度均为 20 mm。为了实现真空区域电场的均匀分布, 在 y 方向设置磁壁边界条件, 在 x 方向加载波导端口进行激励。在频率为 1 GHz 的微波源激励下, 电场分布如图 2(b) 所示, 可以看出, 电场方向垂直于介质和金属表面, 幅度分别在介质和真空两个区域呈均匀分布, 电磁波沿 x 方向传播。可以看出, 该模型能够较好地模拟介质加载平行板波导内电场的分布, 基于该模型可以进行介质加载平行板波导内微放电的仿真研究。

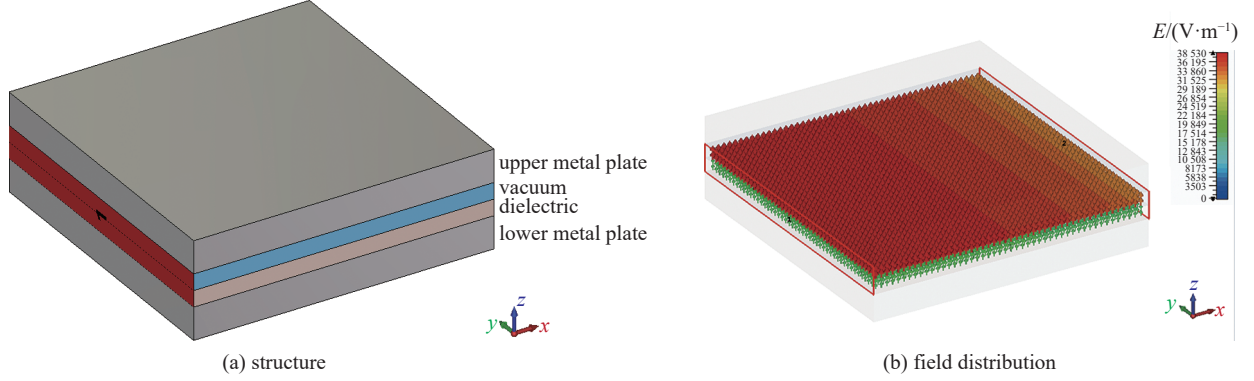


Fig. 2 Structure and field distribution of a dielectric-loaded parallel-plate waveguide

图 2 介质加载平行板波导的结构和电场分布

本文假设金属板材料为银, 图 3 为根据 ESA 标准^[20] 中银的参数对 Vaughan 模型^[21] 进行拟合获得的二次电子发射系数曲线, 同时对低能量段的二次电子发射系数进行了修正^[22-23]。

Vaughan 模型的具体表达式为

$$\delta = \begin{cases} \delta_0, & w \leq 0 \\ \delta_{\max 0}(we^{1-w})^{0.56}, & 0 < w \leq 1 \\ \delta_{\max 0}(we^{1-w})^{0.25}, & 1 < w \leq 3.6 \\ \delta_{\max 0}1.125/w^{0.35}, & w > 3.6 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $w=(W_{\text{im}}-W_0)/(W_{\max 0}-W_0)$, $W_{\text{im}}=mv_{\text{im}}^2/2e$ 是入射电子的能量, δ_{\max} 和 W_{\max} 是依赖于入射角 θ_{im} 的参数。

$$\begin{cases} \delta_{\max}(\theta_{\text{im}}) = \delta_{\max 0}(1 + \theta_{\text{im}}^2/2\pi) \\ W_{\max}(\theta_{\text{im}}) = W_{\max 0}(1 + \theta_{\text{im}}^2/2\pi) \end{cases} \quad (3)$$

对于银来说, 上述 Vaughan 模型中 $\delta_0=0.5$, $W_0=12.5$ eV, $\delta_{\max 0}=2.22$, $W_{\max 0}=165$ eV。

在微放电过程中, 材料二次电子发射的能量和角度都是随机变量, 二次电子发射的能量、极角和方位角分别服从以下概率密度分布

$$f_w(W_{\text{em}}) = \frac{W_{\text{em}}}{W_t^2} \exp\left(-\frac{W_{\text{em}}}{W_t}\right) \Gamma^{-1}\left(2, \frac{W_{\text{em}}}{W_t}\right) \quad (4)$$

$$f_\theta(\theta_{\text{em}}) = \cos(\theta_{\text{em}}), \quad 0 < \theta_{\text{em}} < \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

$$f_\varphi(\varphi_{\text{em}}) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 < \varphi_{\text{em}} < 2\pi \quad (6)$$

其中 Γ 为不完全伽马函数, W_{im} 和 W_{em} 分别是入射电子能量和二次电子发射能量, 与入射电子速度 v_{im} 和二次电子发射速度 v_{em} 的关系分别为 $W_{\text{im}}=mv_{\text{im}}^2/2e$, $W_{\text{em}}=mv_{\text{em}}^2/2e$, 其中 m 和 e 分别是电子的质量和电量, W_t 为二次电子的平均出射能量, 取 7.5 eV。 θ_{em} 和 φ_{em} 分别是二次电子发射的极角和方位角。入射电子速度 v_{im} 和极角 θ_{im} 与二次电子发射速度 v_{em} 、极角 θ_{em} 和方位角 φ_{em} 的定义如图 4 所示。

在实际应用中, 介质通常具有自身的二次电子发射系数, 不同介质材料的二次电子发射系数不同。而在本文

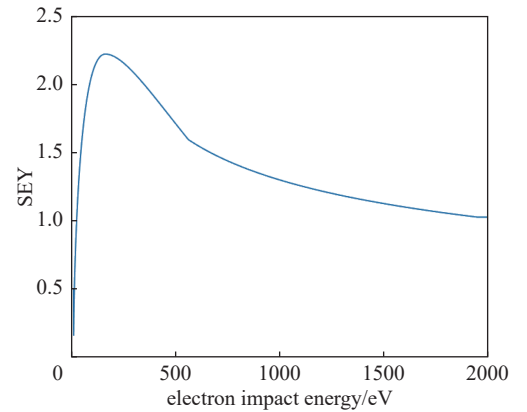


Fig. 3 Secondary electron yield (SEY) of silver based on Vaughan's model

图 3 银的基于 Vaughan 模型的二次电子发射系数曲线

中,重点想要厘清空间电荷和介质表面电荷对微放电演化过程的影响及两者在其中的作用,为了进行三种情况的定量比较,本文将介质的二次电子发射系数也采用银的参数,即假设一种相对介电常数是2.1、电子发射特性与银相同的介质。这样处理将有助于清楚地展示两者在微放电中扮演的角色和所起的所用,从而排除因二次电子发射系数不同带来的差异。

需要说明的是,为了进行比较,在仿真中确保三种情况下金属板和介质表面之间的外加激励电压幅度始终相同。

2 仿真结果

采用商业仿真软件 CST Particle Studio 对介质加载平行板波导的微放电过程进行仿真研究,采用直六面体进行网格剖分,其中 x 方向 20 个网格, y 方向 20 个网格, z 方向 21 个网格,为了准确模拟电场分布及电子的运动,在 z 方向上介质划分了 5 个网格,真空区域划分了 6 个网格,这样能够保证介质和真空中电场的仿真精度。介质与上金属板之间的外加激励电压幅度为 38.53 V。

图 5 为介质加载平行板波导分别在三种情况下的电子数目随时间变化的仿真结果。仿真时长为 150 ns,纵轴为宏粒子数目,一个宏粒子包含 10^4 个电子。其中,情况 1 是仅考虑外加微波场的仿真结果。在这种情况下,未考虑电子数目的饱和机制,理论上电子数目可以无限增长。从图 5 可以看出,

在对数坐标下电子数目增长速率近似为恒定值。情况 2 为考虑外加微波场和空间电荷而不考虑介质表面电荷的情况。可以看出,在微放电初期,二次电子数目随时间逐渐增大,增长速率与情况 1 相同。但随着仿真时长的增加,电子数目增长速率逐渐减小,最后增长速率趋于零,电子数目达到饱和状态,通过与情况 1 进行比对可以看出,空间电荷使得电子数目达到饱和状态,而不是无限增长。情况 3 为同时考虑外加微波场、空间电荷和介质表面电荷。可以看出,在前 80 ns,情况 3 与情况 2 几乎重合,这说明在微放电从起始到饱和的演化过程中,介质表面电荷较少,对二次电子倍增过程的影响非常微弱,而在 80 ns 以后,介质表面电荷所产生的类直流电场的影响变得显著,使得饱和状态无法持续,电子数目从饱和状态的最大值逐渐减小。可以看出,介质表面电荷产生的类直流电场是介质微放电从饱和转向熄灭的主要原因。

为了厘清这其中的机制,后续对三种情况的瞬态二次电子发射系数、端口归一化反射波电压以及介质表面与上金属板之间的间隙电压进行了仿真研究。

三种情况的上金属板、介质和平均瞬态二次电子发射系数如图 6 所示,瞬态二次电子发射系数定义为以观察时刻为中心的半个微波周期内出射电子数目与入射电子数目的比值。图 6(a)为情况 1 的仿真结果,可以看出,由于不考虑空间电荷和介质表面电荷,上金属板和介质的瞬态二次电子发射系数均稳定至约 1.1,因此电子数目以几乎恒定的增长速率持续增加,这与图 5 中的情况 1 相符。图 6(b)为情况 2 的仿真结果,可以看出,上金属板和介质的瞬态二次电子发射系数均先增大后减小,并在 60 ns 以后稳定至 1,因此在微放电初期电子数目会首先增加,在瞬态二次电子发射系数降至 1 以后电子数目趋向于饱和,这与图 5 情况 2 的饱和状态相符。可以看出,对上述两种情况,平均瞬态二次电子发射系数与上金属板和介质的瞬态二次电子发射系数趋势一致,均分别稳定至相同的值。图 6(c)为情况 3 的仿真结果,可以看出,上金属板的瞬态二次电子发射系数由大于 1 降至 1 以下,而介质的瞬态二次电子发射系数从大于 1 降至约为 1,将两者进行比较可以看出,上金属板的瞬态二次电子发射系数下降得更快。结合后续的介质表面带正电荷的情况,当电子从介质向金属板运动时,介质表面正电荷所产生的类直流电场对电子具有减速作用,撞击能量减小,在电子能量小于最大二次电子发射系数对应的能量 $W_{\max 0}$ 时,二次电子发射系数随着撞击能量的减小而减小;而当电子从金属板向介质运动时,类直流电场对电子具有加速作用,撞击能量

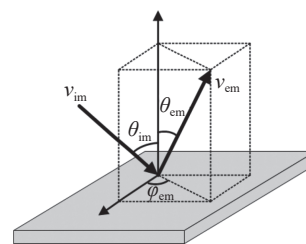


Fig. 4 Scheme of secondary emission velocity v_{em} , polar angle θ_{em} and azimuth angle ϕ_{em} with incident velocity v_{im} and incident angle θ_{im}

图 4 入射电子速度 v_{im} 和极角 θ_{im} 、二次电子发射速度 v_{em} 极角 θ_{em} 和方位角 ϕ_{em} 的定义示意图

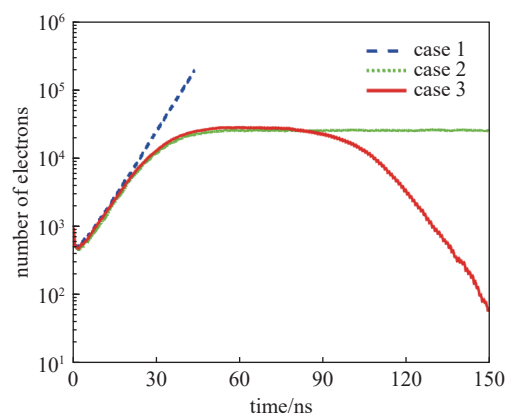


Fig. 5 Dynamic evolution of population of electrons for three cases

图 5 三种情况的电子数目时变曲线

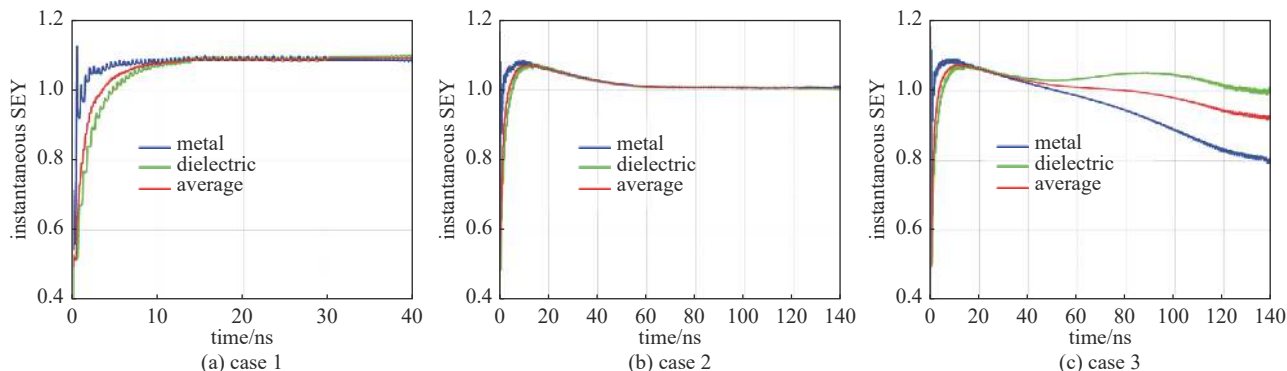


Fig. 6 Instantaneous secondary electron yield (SEY) versus time

图 6 瞬态二次电子发射系数时变曲线

增大,在电子能量小于最大二次电子发射系数对应的能量 $W_{\max 0}$ 时,二次电子发射系数随着撞击能量的增大而增大。这合理解释了上金属板的瞬态二次电子发射系数相对于介质下降得更快的现象。观察平均瞬态二次电子发射系数可以看出,其在 80 ns 时降至 1 后持续减少,这与图 5 的情况 3 电子数目先增加至饱和状态后逐渐减小的趋势相符。

图 7 为三种情况的入射端口归一化反射波电压随时间的变化过程,归一化反射波电压定义为 $\sqrt{2P_r}$,其中 P_r 为端口激励功率。图 7(a) 为情况 1,其归一化反射波电压幅度不到 0.01 V,并且不随时间变化,这代表该结构的固有反射,由于未考虑空间电荷的影响,其反射保持不变。图 7(b) 为情况 2,在初始阶段,其反射系数是结构固有反射,但是随着仿真时长的增加,归一化反射波电压幅度迅速增加,并在 60 ns 以后稳定至约 0.48 V,可以看出,空间电荷效应使得微放电所引起的反射趋于饱和状态。图 7(c) 为情况 3,其归一化反射波电压先增大至某一最大值后又逐渐减小,可以看出,表面电荷产生的类直流电场使得反射在增加至最大值后又逐渐减小至结构固有反射,归一化反射波电压幅度随时间变化的包络类似于“眼睛”的形状。由于微放电的检测通常采用基于反射变化的正反向调零法,不同于传统金属结构微波部件,介质加载微波部件中微放电引起的反射变化具有瞬态特性,对微放电检测方法的响应时间提出了更高要求,这对介质微波部件微放电检测具有指导意义。

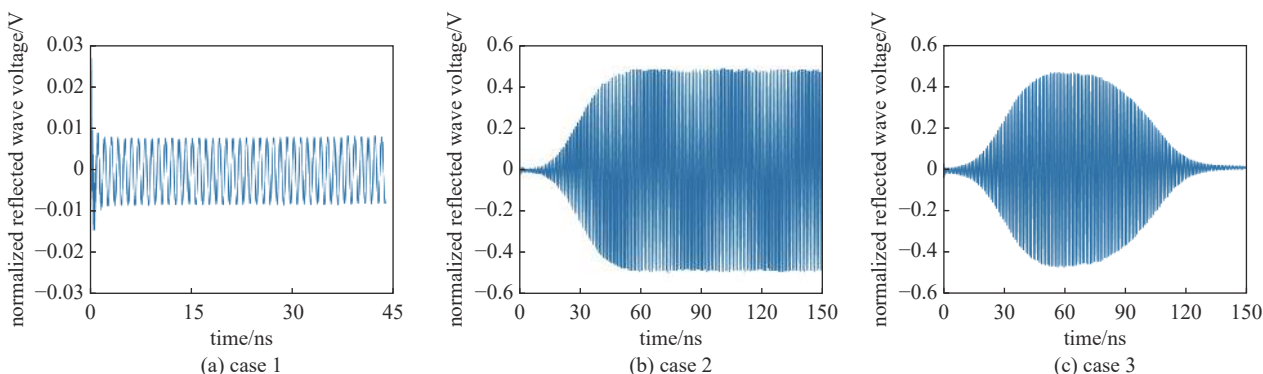


Fig. 7 Normalized reflected wave voltage versus time

图 7 归一化反射波电压时变曲线

图 8 为三种情况的介质表面与上金属板间隙电压随时间的变化过程,介质表面与上金属板之间的间隙电压定义为总电场(包括激励信号产生的微波场、空间电荷产生的库伦场和介质面电荷产生的类直流电场三部分)从介质表面到上金属板的线积分。可以看出,情况 1 间隙电压幅度始终不变,如图 8(a) 所示。情况 2 在 0~50 ns 范围内电压幅度略微减小,如图 8(b) 的插图所示,之后一直保持稳定,说明空间电荷使得间隙电压略微减小,但饱和之后其间隙电压保持不变。而情况 3 则显著不同,可以看出,间隙电压在已有的交流分量的基础上叠加了类似于直流的正电压,如图 8(c) 所示,这是介质表面累积电荷所产生的类直流电场与微波场叠加作用的结果,即介质表面电荷在介质与上金属板之间产生了类似于直流电场的偏置。

从以上仿真结果可以看出,介质表面电荷产生了介质和上金属板的瞬态二次电子发射系数下降速度不同、归一化反射波电压幅度随时间变化的包络呈“眼睛”形状、间隙电压叠加直流偏置等诸多新现象。

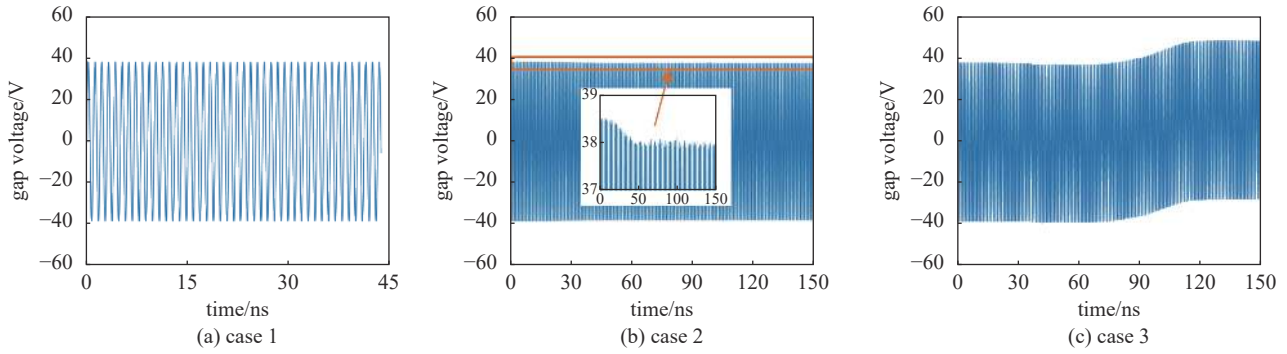


Fig. 8 Gap voltage between the dielectric surface and upper metallic plate surface versus time

图 8 介质表面与上金属板间隙电压时变曲线

下面对情况 3 电子和介质表面电荷的空间分布进行了仿真。图 9 分别为 $t=20, 60, 100, 140$ ns 时刻电子的空间分布图, 右侧的颜色标尺表示电子的能量, 单位为 eV。可以看出在 60 ns 时电子数目较大, 并在介质和上金属板之间的真空区域内均匀分布, 当仿真时间增加至 100 ns 时, 电子数目逐渐减少, 如图 9(c) 所示, 在 240 ns 时电子显著减少, 如图 9(d) 所示。从图 9 可以清楚得看出在空间电荷和介质表面电荷的作用下微放电先增加至饱和状态后自行熄灭的过程。

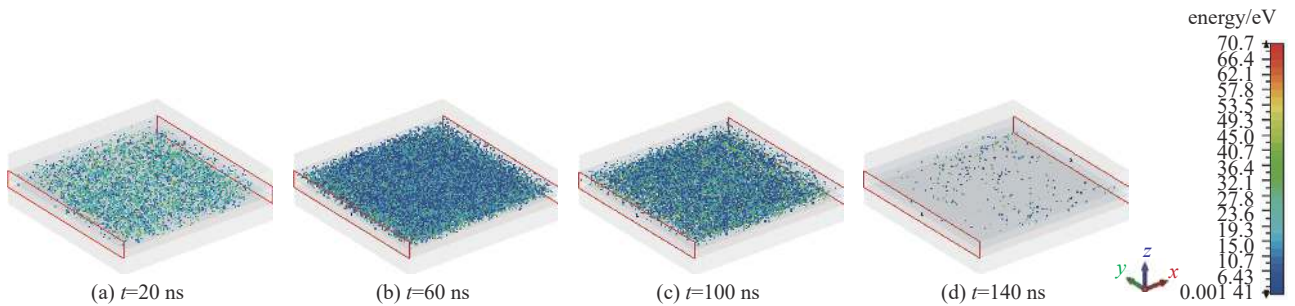


Fig. 9 Electron distribution versus time for case 3

图 9 情况 3 电子分布随时间的变化

图 10 分别为 $t=20, 60, 100, 140$ ns 时刻介质表面电荷分布图, 右侧的颜色标尺表示电荷密度, 单位为 C/m^3 。可以看出, 表面电荷在除边缘以外的介质表面上几乎均匀分布, 这与本文所选择结构的均匀电场分布是一致的。从图 10 可以看出, 介质表面电荷随仿真时长逐渐增加, 并最终达到饱和状态, 在 140 ns 时达到 $0.0028 C/m^3$ 。与电子的湮灭不同, 介质表面会持续带电。

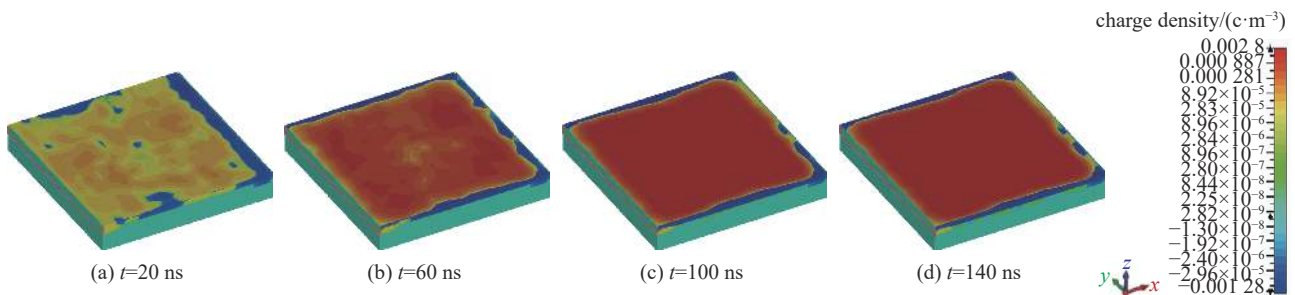


Fig. 10 Charge density on the surface of dielectric versus time for case 3

图 10 情况 3 介质表面电荷密度随时间的变化

为了厘清介质表面电荷对电子能量的影响, 分别对情况 2 和情况 3 空间电子的能量特性进行了仿真。图 11 和图 12 分别为情况 2 和情况 3 微放电处于饱和状态时相邻半微波周期电子能量随位置的分布。其中横坐标 $z=1$ mm 代表介质表面, $z=2$ mm 代表上金属板下表面。半微波周期为 0.5 ns, 对于 1 mm 的间隙, 微放电阶数为 1。由于二次电子发射速度和角度的随机性, 微放电过程中大量的二次电子并不会同步地运动。图 11(a) 为电子与介质表面 ($z=1$ mm) 发生碰撞后, 在外加微波场的作用下朝上金属板移动, 并且随着位置越靠近上金属板, 电子受电场的加速距离越长, 电子能量越大。同理, 图 11(b) 为电子与上金属表面 ($z=2$ mm) 发生碰撞后, 在外加微波场的作用下朝

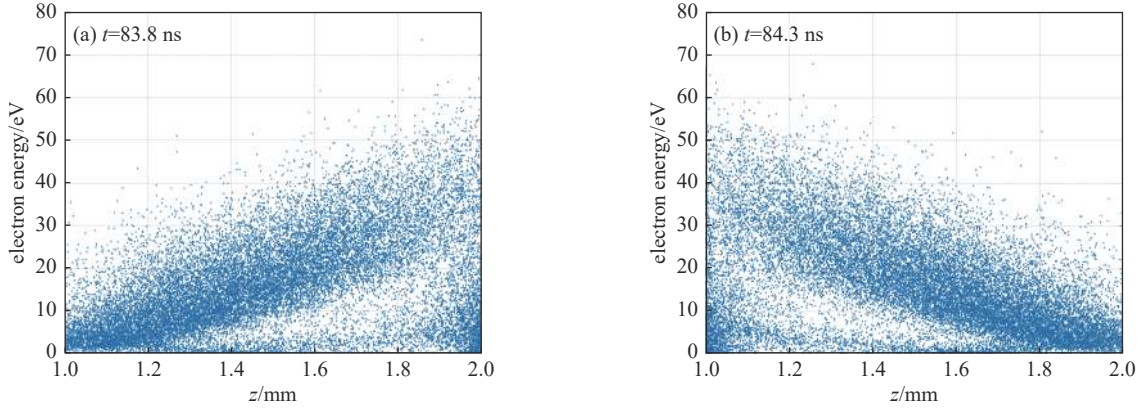


Fig. 11 Electron energy distribution versus position for case 2 in saturation state

图 11 情况 2 饱和阶段电子能量随位置的分布

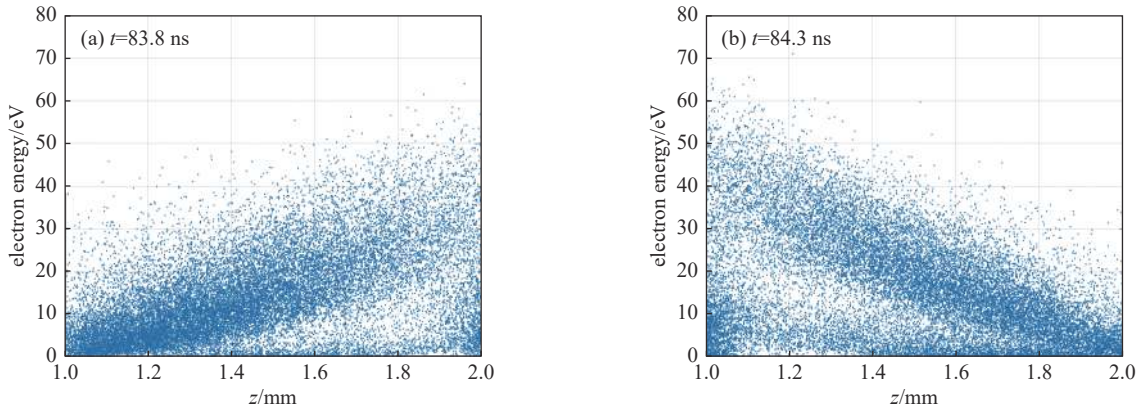


Fig. 12 Electron energy distribution versus position for case 3 in saturation state

图 12 情况 3 饱和阶段电子能量随位置的分布

介质移动,并且随着位置越靠近介质表面,电子受电场的加速距离越长,电子能量越大。可以看出,由于二次电子发射速度和角度的统计特性,二次电子分布不是薄片,而是在空间呈一定的宽度,这印证了单电子薄片模型与微放电实际物理过程不符的判断。

图 11(a)右下角的低能量电子为部分与上金属板碰撞的电子产生的二次电子,由于新产生的二次电子能量符合公式(4)给出的概率密度函数,并且由于新产生电子尚未得到足够的加速,因此其能量主要集中在低能量段。同理在图 11(b)左下角,也存在低能量的出射电子。对比图 11(a)和图 11(b)可以看出,两者近似具有对称性,这是由于情况 2 只考虑微波场和空间电荷,没有考虑介质表面电荷的类直流电场,因此电子的能量在相邻半微波周期呈近似对称分布。

图 12 为情况 3 在相同时刻电子能量随位置的分布图,该情况考虑了介质表面电荷产生的类直流电场。通过对比可以看出,相对于图 12(a),图 12(b)中电子能量整体偏高。特别是对于能量在 50 eV 以上的情况,图 12(b)的电子数目明显多于图 12(a)。这是由于介质表面正电荷产生的类直流电场对电子存在向介质一侧的吸引力,该力在电子从介质到上金属板运动时起减速作用、在电子从上金属板到介质运动时起加速作用。

图 12(b)中碰撞新产生的低能量二次电子数目多于图 12(a)。这是因为,在间隙固定的情况下,当电子从上金属板向介质运动时,类直流电场的加速作用使得电子运动到介质表面时的能量更大,所用时间更短。一方面,在固定的半微波周期内,会有更多的电子运动到介质表面;另一方面,观察图 12 可以看出,电子能量均低于 80 eV,小于本文所采用银的最大二次电子发射系数所对应的能量 $W_{\max 0}$,而在 W_0 和 $W_{\max 0}$ 之间的能量段,二次电子发射系数随着碰撞能量的增加而增大,更大的碰撞能量使得二次电子发射系数更大,从而产生更多的低能量二次电子。这有效解释了图 12(b)中碰撞新产生的低能量二次电子数目多于图 12(a)的现象。

可以看出,对于情况 3,在外加微波场和空间电荷的基础上,考虑了介质表面电荷所产生类直流电场的影响,使得相邻半微波周期的电子能量分布具有明显的不对称特性。

图 13 给出了情况 3 微放电熄灭过程中相邻半微波周期的电子能量随位置的分布。相对于图 12,此时的电子

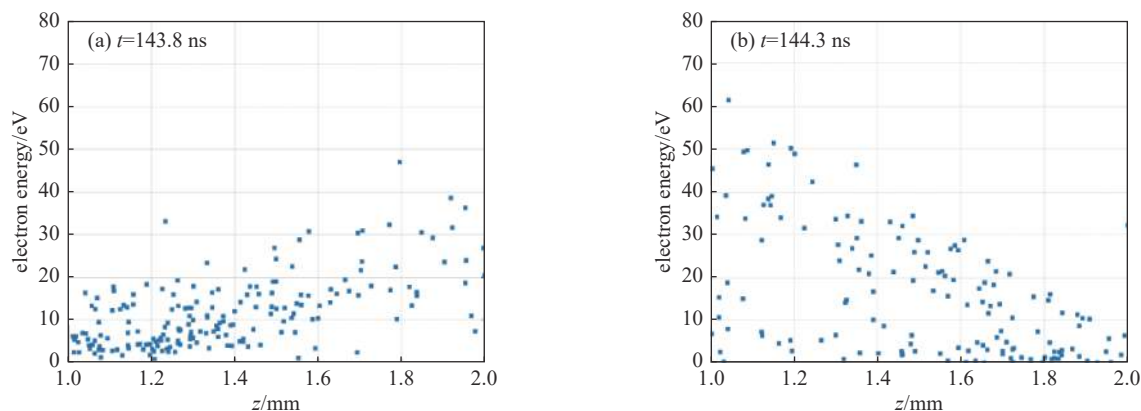


Fig. 13 Electron energy distribution versus position for case 3 in extinguishing state

图 13 情况 3 熄灭阶段电子能量随位置的分布

数目显著减少。图 13(a)为电子离开介质表面在外加微波场和介质表面电荷产生的类直流电场的作用下向上金属板运动,图 13(b)为电子离开上金属板在外加微波场和介质表面电荷产生的类直流电场的作用下向介质表面运动。可以清楚地看出,由于介质表面电荷所产生的类直流电场的偏置作用,使得相邻半微波周期的电子能量分布具有明显的不对称性。

3 结论

通过对介质微波部件中典型的介质加载平行板波导的微放电演化过程进行仿真研究,明确了空间电荷和介质表面电荷在微放电过程中所起的不同作用。研究表明,空间电荷会使微放电达到饱和状态,介质表面电荷则导致微放电饱和状态无法持续,最后自行熄灭,而介质表面会持续带电。介质表面电荷使得上金属板和介质表面的瞬态二次电子发射系数下降速率不同,平均瞬态二次电子发射系数最终降至 1 以下,归一化反射波电压幅度随时间变化的包络呈类似于“眼睛”的形状,具有典型的瞬态特性,介质表面电荷对介质与上金属板之间的间隙电压产生了类直流偏置,介质表面电荷产生的类直流电场使得相邻半微波周期的电子能量分布具有非对称特性,本文的研究结论对介质微波部件微放电设计和测量具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Farnsworth P T. Television by electron image scanning[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1934, 218(4): 411-444.
- [2] Vaughan J R M. Multipactor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1988, 35(7): 1172-1180.
- [3] Woode A, Petit J. Investigations into multipactor breakdown in satellite microwave payloads[J]. *ESA Journal*, 1990, 14(4): 467-478.
- [4] Rozario N, Lenzing H F, Reardon K F, et al. Investigation of Telstar 4 spacecraft Ku-band and C-band antenna components for multipactor breakdown[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1994, 42(4): 558-564.
- [5] Yu Ming. Power-handling capability for RF filters[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2007, 8(5): 88-97.
- [6] Panariello A, Yu Ming, Ernst C. Ku-band high power dielectric resonator filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(1): 382-392.
- [7] Li Shuqi, Wang Ying, Yu Ming, et al. Efficient modeling of Ku-band high power dielectric resonator filter with applications of neural networks[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(8): 3427-3435.
- [8] Kishek R A, Lau Y Y, Ang L K, et al. Multipactor discharge on metals and dielectrics: Historical review and recent theories[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(5): 2120-2126.
- [9] Kishek R A, Lau Y Y. Multipactor discharge on a dielectric[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(1): 193-196.
- [10] Chang Chao, Liu Guozhi, Tang Chuanxiang, et al. Review of recent theories and experiments for improving high-power microwave window breakdown thresholds[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 055702.
- [11] Ang L K, Lau Y Y, Kishek R A, et al. Power deposited on a dielectric by multipactor[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1998, 26(3): 290-295.
- [12] Torregrosa G, Coves A, Vicente C P, et al. Time evolution of an electron discharge in a parallel-plate dielectric-loaded waveguide[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2006, 27(7): 619-621.
- [13] Coves Á, Torregrosa-Penalva G, Vicente C, et al. Multipactor discharges in parallel-plate dielectric-loaded waveguides including space-charge effects[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, 55(9): 2505-2511.
- [14] Torregrosa-Penalva G, Coves Á, Martínez B G, et al. Multipactor susceptibility charts of a parallel-plate dielectric-loaded waveguide[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010, 57(5): 1160-1166.

- [15] Sounas A L, Sorolla E, Mattes M. Investigation of multipactor steady state in parallel-plate waveguides loaded by a single dielectric slab[C]//8th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation. 2014.
- [16] Sounas A, Sorolla E, Mattes M. Multipactor analysis in parallel-plate waveguides loaded by a single dielectric slab[C]. 8th European Conference on Antennas and Propagation. 2014: 1469-1470.
- [17] Sounas A. Modeling of long-term multipactor evolution in microwave components including dielectric layers[D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2015.
- [18] 翟永贵, 王瑞, 王洪广, 等. 介质部分填充平行平板传输线微放电过程分析[J]. *物理学报*, 2018, 67: 157901. (Zhai Yonggui, Wang Rui, Wang Hongguang, et al. Multipactor in parallel-plate transmission line partially filled with dielectric material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 157901)
- [19] Langelotti S V, Jordan N M, Lau Y Y, et al. CST particle studio simulations of coaxial multipactor and comparison with experiments[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(6): 1942-1949.
- [20] ECSS-20-01A-2003, Space engineering: multipacting design and test[S].
- [21] Vaughan J R M. A new formula for secondary emission yield[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1989, 36(9): 1963-1967.
- [22] Vicente C, Mattes M, Wolk D, et al. Multipactor breakdown prediction in rectangular waveguide based components[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005. Long Beach, USA: IEEE, 2005: 1055-1058.
- [23] Anza S, Vicente C, Gimeno B, et al. Long-term multipactor discharge in multicarrier systems[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14: 082112.