



·高功率微波技术·

# 大功率铁磁性微波部件微放电演变机理与抑制<sup>\*</sup>

李 韵<sup>1</sup>, 封国宝<sup>1</sup>, 谢贵柏<sup>1</sup>, 苗光辉<sup>1</sup>, 李小军<sup>1</sup>, 崔万照<sup>1</sup>, 贺永宁<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室, 西安 710100; 2. 西安交通大学 微电子学院, 西安 710049)

**摘 要:** 铁氧体环行器是承载航天器微波系统大功率的关键器件, 其大功率微放电效应是影响航天器在轨安全、可靠运行的瓶颈问题。从影响微放电效应的关键因素——二次电子发射特性出发, 提出铁磁性微波部件微放电效应物理演变模型, 揭示了铁磁性微波部件内部初始自由电子与二次电子运动的空间规律; 通过改变铁磁性微波部件表面二次电子发射特性, 揭示了铁磁性微波部件抗微放电优化设计的物理原理。在 S 频段铁氧体环行器中验证了基于表面二次电子发射特性的微放电效应抑制, 将器件的微放电阈值从 380 W 提高至 3400 W 以上, 提升效率大于 900%。

**关键词:** 星载; 铁氧体环行器; 微放电; 抑制; 演变机理

中图分类号: TN61; O462.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210479

## Multipactor evolution and suppression in high-power ferromagnetic components

Li Yun<sup>1</sup>, Feng Guobao<sup>1</sup>, Xie Guibai<sup>1</sup>, Miao Guanghui<sup>1</sup>, Li Xiaojun<sup>1</sup>, Cui Wanzhao<sup>1</sup>, He Yongning<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

2. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Ferrite circulators are key components in the high-power microwave systems for the satellite payload application. Multipactor, which is prone to occur in the high-power vacuum system, is still a bottleneck problem for the on-orbit reliable system operation. The physical evolution model of multipactor in ferromagnetic components is proposed based on the secondary electron emission (SEE) properties. Using the model, the evolution laws of the initial electrons and multipacting electrons in practical components with micro-pore arrays are revealed. Furthermore, a novel anti-multipactor design method is proposed through controlling the surface SEE of the ferromagnetic material. A group of S-band circulators were designed and fabricated for the validation of the theory and design method. Calculation results and measurement data demonstrate that multipactor discharge has been suppressed successfully through lowering the surface SEE on the ferrite plates. Multipactor threshold power of the traditional circulator has been improved from 380 W to more than 3400 W using the optimized micro-pore structures, and the suppression efficiency is increased by more than 900%.

**Key words:** satellite, ferromagnetic circulator, multipactor, suppression, evolution mechanism

在空间环境中, 微波部件在大功率微波的作用下, 由于材料表面二次电子发射<sup>[1-6]</sup>引发的电子倍增以致雪崩击穿的物理效应称为二次电子倍增效应, 即微放电效应<sup>[7-9]</sup>, 它在航天器系统、加速器、空间等离子体、高功率介质窗以及多种基础科学仪器研制等领域影响显著。对于航天器系统而言, 当射频功率、相位、材料二次电子发射、气压满足一定条件时, 将发生微放电效应。当微放电效应发生时, 轻则导致微波部件表面损坏、功率损失、信号交调, 影响系统正常工作、性能下降, 甚至引发气体放电等其他物理现象, 导致在轨无法修复的灾难性硬故障<sup>[10-11]</sup>。铁磁性微波部件<sup>[12]</sup>是雷达、通信等类型航天器承载大功率的重要元器件, 主要功能为实现输入、输出端口信号的分路传输和功率隔离。采用尖晶石铁氧体、石榴石铁氧体的铁氧体环行器是在微波频段应用广泛的铁磁性微波部件。随输入功率的增大, 铁氧体环行器发生微放电效应的风险急剧增加, 由此引发航天器系统存在高风险。近

\* 收稿日期: 2021-11-09; 修订日期: 2022-01-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12175176); 中国航天科技集团有限公司自主创新项目 (Y20-JTKJCX-01); 陕西省特支计划青年拔尖人才项目  
联系方式: 李 韵, [liy74@cast504.com](mailto:liy74@cast504.com)。

年来,随空间科学与技术的发展,尤其随应用场景的多样化发展,航天器微波系统工作频率越来越高,工作功率越来越大,铁磁性微波部件微放电效应问题逐渐凸显。针对铁磁性微波部件,尤其是铁氧体环行器的微放电效应,国内外高校、研究机构和宇航组织展开了研究,取得了一定的研究成果。在铁磁性微波部件微放电效应仿真与分析方面,2016年,西班牙瓦伦西亚理工大学 Boria 教授及其团队提出了包含垂直磁化铁氧体的微放电击穿分析物理模型,该方法基于平行平板等效,并未分析实际铁磁性微波部件的微放电效应演变过程<sup>[13]</sup>。2019年,该团队采用简单的波导器件内加载铁氧体片的方式对所提出的物理模型进行了验证<sup>[14]</sup>。国内西安交通大学王洪广等人提出了基于频域电磁场的微波器件微放电快速粒子模拟方法<sup>[15-16]</sup>,并研究了该方法应用于铁氧体环行器微放电效应击穿功率阈值分析的算法特殊性<sup>[17]</sup>。在铁磁性微波部件微放电效应抑制方面,马德里 CSIC 材料研究所的 I. Montero 等人提出了在铁磁性介质表面沉积 NiZn 和 MnZn 粉末的方法,将铁磁性材料的最大二次电子发射产额降低<sup>[18]</sup>;国内西北核物理研究所的常超等人提出了在高功率介质窗表面建立尺度在 mm 量级的三角槽等表面结构,以抑制高功率介质窗微放电效应<sup>[19]</sup>;西安交通大学的贺永宁课题组提出了二维规则表面结构的多重电子束缚二次电子发射理论分析模型<sup>[20-21]</sup>,实现了介质表面二次电子发射的有效抑制。

结合目前国内研究,对于实际铁磁性微波部件微放电效应的分析与抑制而言,主要存在以下难点:①实际铁磁性微波部件内部场分布复杂,要同时考虑射频电磁场和外加静态磁场偏置对电子运动轨迹的影响,进而分析微放电演变机制的困难;②现有二次电子发射抑制方法尚未在铁氧体材料表面取得明显的抑制效果;③由于铁磁性介质脆度和硬度高、抗腐蚀等特点,同时大面积表面结构制备困难,基于二次电子发射抑制的方法未在实际磁性微波部件中得到应用。

本文针对以上研究难点,首先研究了考虑外加磁场偏置和介质表面电荷积累条件下铁磁性微波部件微放电演变机制;然后基于铁磁性微波部件微放电效应对二次电子发射敏感性机理,提出了采用表面处理抑制铁磁性材料表面二次电子发射特性,进而抑制其微放电效应的方法;最后在铁氧体环行器中通过激光刻蚀在铁氧体材料表面实现了表面微结构大面积、均匀制备,验证了微放电效应抑制方法的有效性。

## 1 模 型

### 1.1 理论模型

大功率铁磁性微波部件通常采用波导腔体结构,包括金属腔体、铁氧体、永磁铁。铁氧体是实现电磁波传播路径改变的关键材料,采用永磁铁对铁氧体介质进行偏置。铁磁性微波部件中发生微放电时,电子往往在铁氧体材料附近聚集和倍增击穿。不同于金属微放电,此时需要考虑铁氧体表面的电荷积累和永磁铁磁场对微放电电子运动轨迹、运动能量的改变。建立铁氧体之间发生微放电时电子运动轨迹的理想模型如图 1 所示。在接近真空环境下(气压小于  $10^{-3}$  Pa),空间中的自由电子平均自由程远大于铁氧体间距。自由电子在射频电磁场 ( $E_{rf}$ ,  $B_{rf}$ ) 和由永磁铁提供的静磁场的作用下作变速回旋运动,回旋半径为

$$R_0 = m_e v_0 / q_e (B_{rf} + B_0) \quad (1)$$

式中:  $m_e$  为单位电子质量;  $q_e$  为单位电子电量;  $v_0$  为电子运动速度;  $B_{rf}$  为射频磁场;  $B_0$  为静磁场。

此时,用于偏置铁氧体的永磁铁的静磁场在  $10^{-2}$  T 量级,对于工作功率远小于 10 kW 量级的射频电磁场而言,射频磁场对电子的作用可忽略。当自由电子在铁氧体之间来回反复碰撞时,每次碰撞以一定概率产生二次电子,若每次碰撞的平均二次电子产额 (SEY) 持续大于 1,将发生二次电子倍增效应,即微放电。随电子数目倍增,铁氧体表面将逐渐产生电荷积累。根据文献 [22] 可知,在微放电初期,自由电子在铁氧体表面随机累积,产生少量的负电荷积累。在微放电电子谐振倍增阶段,随二次电子数目呈指数增长,铁氧体表面迅速积累正电荷。此时,积累电荷场  $E_{dc}$  会对微放电电子的运动速度、与铁氧体碰撞时的能量、二次电子发射时的能量均产生影响。

### 1.2 理论计算结果

现有研究表明,在铁磁性材料表面沉积具有一定颗粒半径的 NiZn 和 MnZn 粉末或者建立与波长可比拟的沟槽结构能,在一定程度上降低铁磁性材料的二次电子发射特性或抑制介质部件微放电效应。考虑不影响铁磁性微波部件电性能,尤其是损耗特性的前提下,本文在铁氧体表面构建远小于波长的微孔结构,研究其二次电子发

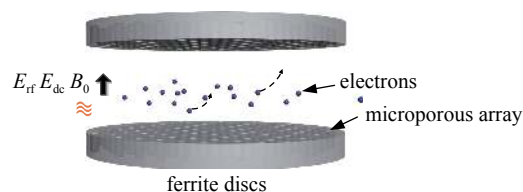


Fig. 1 Scheme of multipactor electrons moving between ferrite dielectrics

图 1 铁氧体之间发生微放电时电子运动轨迹的理想模型

射特性。

根据理想理论模型的分析,建立进入微孔结构中的电子运动方程为

$$m_e \frac{dv_0}{dt} = q_e(E_{rf} + E_{dc}) + q_e v_0 \times B_0 \quad (2)$$

通过数值求解获得电子运动轨迹,结合微孔结构的边界条件,得到随机入射到具有微孔结构铁氧体材料表面的  $N_0$  个初始电子再与微孔结构碰撞后,最终从具有微孔结构铁氧体材料表面出射的电子产额数  $N_1$ 。得到具有微孔结构铁氧体材料表面的实际二次电子发射产额为  $\delta_{real} = N_1/N_0$ 。将电子的初始能量定义为变量  $E_i$ ,在仿真中可以改变  $E_i$  的值;在本文中将  $E_i$  设置为 5 eV。对电子的初始角度定义为  $0 \sim 90^\circ$  之间的随机数,服从  $\sim \cos\theta$  分布;每个电子的初始速度可以根据初始能量和初始角度求得。

定义微孔结构的宽度为  $W$ ,深度为  $H$ ,深宽比为  $S_r = H/W$ ,得到具有不同相对尺寸  $S_r$  微孔结构的铁氧体二次电子产额 (SEY),如图 2 所示。当电子运动进入微孔结构时,电子以回旋运动的形式获得加速。由于电子或空穴的沉积形成了表面势垒。当电子运动并与微孔结构边界碰撞时,取决于碰撞能量和角度,以一定概率发射具有更低能量的二次电子。无法克服表面势垒的二次电子将被吸收。此时,在铁氧体表面形成了电子束缚效应,实际的 SEY 降低。由图 2 可知,当  $S_r \geq 2$  时,微孔结构对电子的束缚效应开始显现,从铁氧体表面出射的最大 SEY 降低至小于 1.5。随微孔深度的增加至  $S_r \geq 4$ ,电子束缚效应越发显著,平均 SEY 接近于 1,可以推断此时亦不易发生微放电。当  $S_r \leq 1$ ,即微结构的宽度大于或等于深度时,微孔结构对 SEY 产生增强效应。

进一步研究由于铁氧体材料的弱导电性引起的表面电荷积累对 SEY 的影响。计算得到不同电荷积累场条件下具有微孔结构铁氧体表面 SEY,如图 3 所示。此时,  $S_r = 2$ 。当铁氧体表面积累负电荷时,对入射电子和出射的二次电子产生斥力,入射电子能量降低、出射电子能量增加。相比于平滑表面而言,具有一定表面积累负电荷时,深宽比为  $E_{dc}$  的微结构对磁性介质 SEY 仍产生抑制作用。但是,随表面积累负电荷进一步增加时,受电荷斥力影响,电子可能无法入射到微孔中。当铁氧体表面积累正电荷时,对入射电子和出射的二次电子产生吸引力,入射电子能量增加,出射电子能量降低。由计算结果可知,表面积累正电荷对于 SEY 有额外抑制作用。 $E_{dc}$  越大,SEY 抑制效果越明显。可以推测,当发生微放电并大量出射二次电子时,材料表面积累正电荷,将削弱微放电的产生。不同静磁场对铁氧体表面二次电子发射特性的影响如图 4 所示。

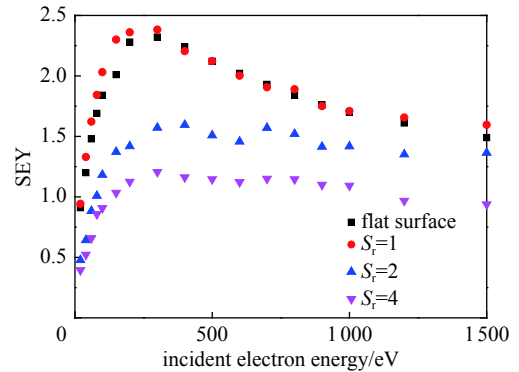


Fig. 2 Secondary electron yields (SEYs) on the ferrite dielectric with different  $S_r$

图 2 具有不同相对尺寸  $S_r$  微孔结构的铁氧体 SEY 计算结果

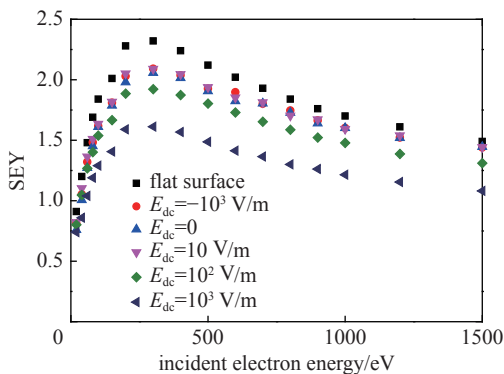


Fig. 3 SEYs on the ferrite dielectric with different  $E_{dc}$

图 3 不同电荷积累场下的铁氧体 SEY 计算结果

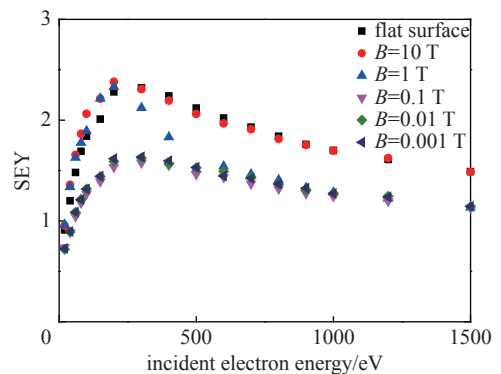


Fig. 4 SEYs on the ferrite dielectric with different  $B_0$

图 4 不同静磁场下的铁氧体 SEY 计算结果

计算结果表明,当  $B_0 \geq 10$  T 时,电子回旋半径远小于微孔半径,此时电子垂直回旋入射到微孔的底部,然后垂直回旋出射,微孔对铁氧体的实际 SEY 不再产生影响,具有微孔结构和平滑表面的铁氧体 SEY 曲线趋向一致。当  $B_0 = 1$  T 时,若电子的入射速度较小,则回旋半径较小,大部分随机入射的电子不与微孔边界发生碰撞,与  $B_0 \geq 10$  T



时的情况一致;然而随入射电子能量增加,电子回旋半径增大,入射电子与微孔边界发生碰撞,当电子回旋半径增大至几乎所有入射电子均与微孔边界发生碰撞时,微孔结构对入射电子的束缚作用开始显现。随外加磁场减小至  $B_0=0.1\text{ T}$ , 电子回旋半径远大于微孔结构半径,则微孔结构对入射电子的束缚作用最强。随外加磁场的进一步减小,微孔结构对入射电子的束缚作用不再变化。

## 2 实验与讨论

### 2.1 二次电子发射测量结果

采用激光刻蚀方法在铁氧体样片表面制备微孔阵列,采用三维激光扫描显微镜(LSM, Keyence VK-9700, Japan)获得铁氧体表面的起伏形貌,并测量微孔结构的宽度和深度分别为  $200\ \mu\text{m}$  和  $350\ \mu\text{m}$ , 如图 5 所示。

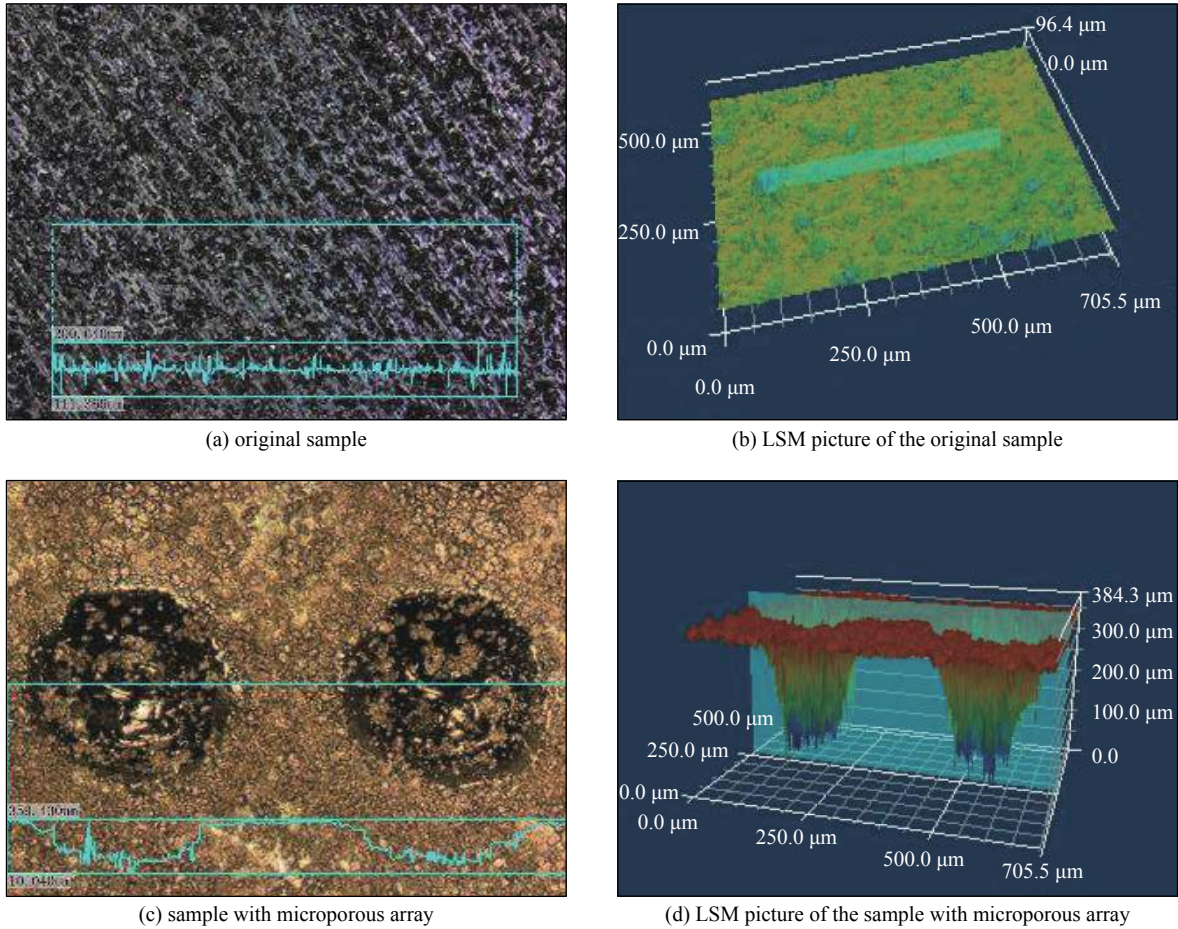


Fig. 5 Surface morphology of ferrite sample

图 5 铁氧体样片表面形貌

在高真空腔体(真空度为  $10^{-7}\text{ Pa}$ )中采用收集级法进行二次电子发射测量。采用脉冲电子枪将一定能量的电子入射到空样品托表面,收集得到样品托和收集极中的总电流  $I_0$ 。然后放入铁氧体样片,从收集极得到一定入射能量下的二次电子电流  $I_c$ 。计算得到一定入射能量  $E_i$  下的二次电子发射产额为  $\delta_i=I_c/I_0$ 。测量得到图 5 中所示的具有微孔阵列铁氧体样片的二次电子发射产额如图 6 所示。与计算结果进行对比,验证了表面微孔阵列对铁氧体样片二次电子发射的有效抑制。

### 2.2 大功率铁氧体环形器微放电测量结果

在 S 频段大功率腔体铁氧体环形器表面实现大面积微孔阵列制备,并测量其电性能 S 参数,如图 7 所示。对于微

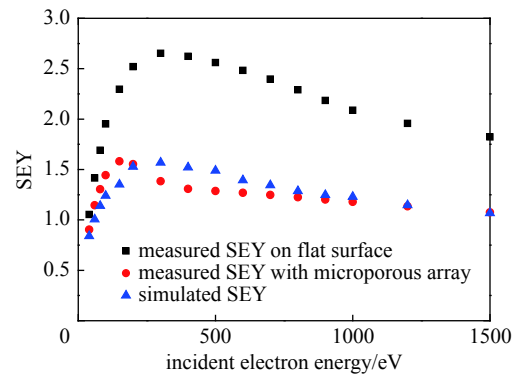


Fig. 6 Comparison of measured and calculated SEYs on the ferrite samples

图 6 铁氧体样片 SEY 测量结果与计算结果对比

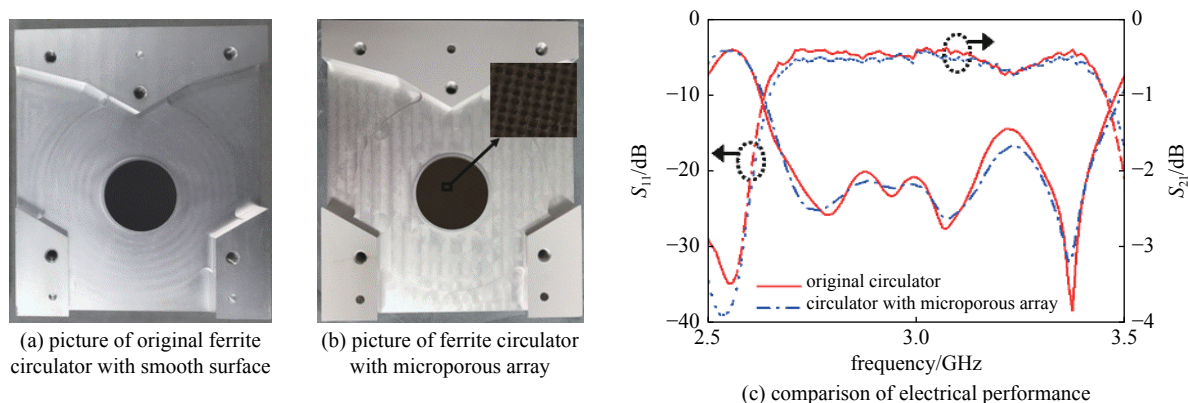


Fig. 7 Comparison of electrical performance in ferrite circulator

图7 铁氧体环形器实物与电性能参数对比

波器件设计微孔阵列时,应当在不影响微波器件的电性能的前提下进行二次电子发射的抑制。如本文中的环形器,中心频率为3 GHz,对应的真空中的波长 $\lambda=100$  mm。为了不影响环形器的电性能,微孔阵列的尺寸应当小于 $0.05\lambda$ 。在本文中微孔阵列的尺寸远小于 $0.01\lambda$ ,保证了环形器的电性能不受影响。与采用机械加工和研磨工艺实现的平滑表面铁氧体环形器相比,具有微孔阵列铁氧体环形器带内插损并无明显恶化。

采用功率调零法对加工的传统平滑表面铁氧体环形器和具有微孔阵列铁氧体环形器进行微放电阈值功率测试,得到其微放电阈值功率分别为380 W和3400 W。实验证明,当铁氧体表面二次电子发射被有效抑制时,其微放电效应同样呈现了卓越的抑制效果。实验验证了具有一定结构的微孔阵列在消除大功率铁磁性微波部件微放电或提高微放电阈值方面的有效性。

### 3 结 论

针对大功率铁磁性微波部件微放电效应展开了理论和实验研究。考虑了铁磁性微波部件表面电荷积累和静磁场偏置对电子运动轨迹的影响,计算了不同带电情况和偏置条件下具有微孔结构铁氧体材料表面的SEY。基于表面微孔结构,研究了铁氧体二次电子发射特性的调控方法与工艺实现,并在大功率铁氧体环形器中通过改变铁氧体表面的二次电子发射特性,实现了铁氧体环形器微放电效应击穿功率的大幅度提高。计算结果与实验结果表明,表面电荷积累和静磁场偏置对铁磁性材料的二次电子发射特性产生影响,铁磁性材料表面二次电子发射特性的改变影响微放电效应中电子运动与演变过程,进而导致铁磁性微波部件微放电效应击穿功率的变化。

### 参考文献:

- [1] Vaughan J R M. Multipactor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1988, 35(7): 1172-1180.
- [2] 翟永贵, 李记肖, 王洪广, 等. 微波器件微放电阈值功率自适应扫描方法[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 073006. (Zhai Yonggui, Li Jixiao, Wang Hongguang, et al. Adaptive scanning method for multipactor threshold prediction in microwave devices[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073006)
- [3] 王新波, 崔万照, 魏焕, 等. 微放电试验中种子电子加载方法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 063010. (Wang Xinbo, Cui Wanzhao, Wei Huan, et al. Comparative study of electron seeding in multipactor test[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 063010)
- [4] 刘婉, 翁明, 殷明, 等. 宽气压范围空气中微波击穿电场的计算公式[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 113001. (Liu Wan, Weng Ming, Yin Ming, et al. Formula of microwave breakdown electric field calculation within wide pressure range in air[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 113001)
- [5] 何鑫, 杨晶, 苗光辉, 等. 高性能多功能介质二次电子发射特性研究平台[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 033003. (He Yun, Yang Jing, Miao Guanghui, et al. High-performance multifunctional apparatus for studying secondary electron emission characteristics of dielectric[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 033003)
- [6] Yang Jing, Cui Wanzhao, Li Yun, et al. Investigation of argon ion sputtering on the secondary electron emission from gold samples[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 382: 88-92.
- [7] Schaub S C, Shapiro M A, Temkin R J. Measurement of dielectric multipactor thresholds at 110 GHz[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123: 175001.
- [8] Berenguer A, Coves Á, Mesa F, et al. Analysis of multipactor effect in a partially dielectric-loaded rectangular waveguide[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(1): 259-265.
- [9] Zhang Ziyi, Sun Yanzi, Cui Wanzhao, et al. An analytical model of one-sided multipactor on a dielectric of a metal surface for spacecraft application[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(11): 4921-4927.
- [10] 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.

- [11] González-Iglesias D, Gimeno B, Boria V E, et al. Multipactor effect in a parallel-plate waveguide partially filled with magnetized ferrite[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 61(7): 2552-2557.
- [12] Shalaby M, Peccianti M, Ozturk Y, et al. A magnetic non-reciprocal isolator for broadband terahertz operation[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1558.
- [13] González-Iglesias D, Gómez Á, Gimeno B, et al. Analysis of multipactor RF breakdown in a waveguide containing a transversely magnetized ferrite[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(12): 4939-4947.
- [14] Vague J, Melgarejo J C, Boria V E, et al. Experimental validation of multipactor effect for ferrite materials used in L- and S-band nonreciprocal microwave components[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(6): 2151-2161.
- [15] 王洪广, 翟永贵, 李记肖, 等. 基于频域电磁场的微波器件微放电阈值快速粒子模拟[J]. *物理学报*, 2016, 65: 237901. (Wang Hongguang, Zhai Yonggui, Li Jixiao, et al. Fast particle-in-cell simulation method of calculating the multipactor thresholds of microwave devices based on their frequency-domain EM field solutions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65: 237901)
- [16] Zhai Yonggui, Wang Hongguang, Zhang Lei, et al. Effect of secondary emission yield and initial charge of dielectric material on multipactor in parallel-plate dielectric-loaded waveguide[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(12): 5333-5338.
- [17] 翟永贵, 王瑞, 王洪广, 等. 铁氧体环形器微放电阈值快速粒子模拟[J]. *真空电子技术*, 2017(2): 11-13,28. (Zhai Yonggui, Wang Rui, Wang Hongguang, et al. Fast particle-in-cell method for multipactor threshold calculation of ferrite circulator[J]. *Vacuum Electronics*, 2017(2): 11-13,28)
- [18] Aguilera L, Montero I, Olano L, et al. Secondary emission yield at low-primary energies of magnetic materials for anti-multipactor applications[C]// *Proceedings of the International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation*. Valencia, Spain, 2014: S126.
- [19] Chen C H, Chang C, Liu W Y, et al. Improving the microwave window breakdown threshold by using a fluorinated, periodically patterned surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114: 163304.
- [20] Ye Ming, He Yongning, Hu Shaoguang, 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.
- [21] 叶鸣, 贺永宁, 王瑞, 等. 基于微陷阱结构的金属二次电子发射系数抑制研究[J]. *物理学报*, 2014, 63: 147901. (Ye Ming, He Yongning, Wang Rui, et al. Suppression of secondary electron emission by micro-trapping structure surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 147901)
- [22] Li Yun, Ye Ming, He Yongning, et al. Surface effect investigation on multipactor in microwave components using the EM-PIC method[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 113505.