#### ·粒子束及加速器技术·



# 电子诱发波导微放电实验研究

任三孩1, 古松2, 谭谦1, 叶新1, 方进勇2

(1.北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094; 2.中国空间技术研究院西安分院,西安 710100)

摘 要: 针对宇航微波器件功率密度越来越大,空间电子可能诱发微波器件发生微放电的潜在威胁,通过 设计特殊波导结构,利用电子枪提供的种子电子入射到特殊波导内,在波导内通入大功率微波信号,利用检波 器和示波器分别检测透射波形和反射波形,观察微放电现象的持续过程;改变电子入射能量,观测到不同程度 的微放电现象,该电子枪提供种子电子诱发波导微放电效应的实验方法为微波器件微放电效应研究提供了重 要手段。

## Experimential study of multipactor induced by electrons waveguide

Ren Sanhai<sup>1</sup>, Gu Song<sup>2</sup>, Tan Qian<sup>1</sup>, Ye Xin<sup>1</sup>, Fang Jinyong<sup>2</sup>
(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;
2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China))

Abstract: With the increasing power density of aerospace microwave devices, the possibility of multipactor effect in microwave devices is greatly increased. In view of the potential threat that space electronics may induce the multipactor discharge in microwave devices, a special waveguide structure was designed to study the multipactor discharge. The electron gun provided electron into special waveguide when high power microwave signal were introduced into the waveguide. The power detector and oscillograph were used to detect transmission waveforms and reflection waveform respectively. The continuous process of multipactor phenomenon was obviously observed. This work verifies that electron beam can induce multipactor phenomenon and provides an important means to study multipactor effect of microwave devices.

Key words: electron emission, microwave electromagnetic field, multipactor effect, high power microwave source

真空条件下,电子通过射频场的加速作用,在金属表面间激发二次电子发射和倍增,二次电子倍增到一定程度 产生雪崩效应,形成微放电效应<sup>[1-3]</sup>。微放电效应研究早在20世纪初已经开始,微放电效应的早期研究主要集中在 一些平板类电极和传输线等器件的微放电机理分析工作<sup>[4-6]</sup>。随着航天技术发展,微波器件的结构更加复杂,功率 密度越来越高,空间微波部件发生微放电的可能性大大增加<sup>[7-9]</sup>,卫星通信系统的主要组成部件如输出多工器、波 导腔体滤波器和天线馈源等发生微放电现象,易造成卫星系统性功能异常,空间微放电效应已成为制约高通量空 间通信技术发展的重要因素<sup>[10-12]</sup>。国内外如美国航空与航天局(NASA)、欧洲航天局(ESA)、西安交通大学、东南 大学和航天五院西安分院等研究机构对微放电的危害越来越重视,通过理论分析和数值模拟等微放电阈值分析方 法对大功率微波部件的微放电阈值评估开展研究工作<sup>[13-16]</sup>,对于理论分析和数值模拟方法获得的微放电阈值可通 过微放电实验对其准确性进行验证<sup>[17-18]</sup>。

航天器大功率微波部件易发生双金属表面微放电效应,双金属表面微放电效应的发生从机理上需要同时具备 以下四个条件:真空条件,种子电子,材料二次电子发射系数大于1和电子的渡越时间是微波信号半周期的奇数 倍,才能实现二次电子在两金属表面间的倍增。自由电子的存在是发生微放电的必要条件,导致微波器件发生微

<sup>\*</sup> 收稿日期:2022-11-23; 修订日期:2023-02-03

联系方式:任三孩, sanhairen@163.com;

古 松, gusongcast@163.com。

放电现象是电子倍增的结果,种子电子的存在对微放电效应的发生至关重要。在地面实验室研究和测试微波器件 微放电效应时,需要将种子电子加载到微波器件<sup>[19]</sup>,常用的方法是在微波器件外部贴敷放射源,如铯源和锶源<sup>[20-21]</sup>, 利用放射源的自发裂变产生的各种能量电子和其它裂变粒子与器件材料相互作用发射出来的初始电子作为种子 电子。由于放射源的自发裂变反应固定,同时放射源的自发裂变活度有限,这种方式提供的种子电子能量和通量 基本不可控,出射电子的通量有限,不能给出定量的种子电子参数,只能从定性的角度模拟微波器件微放电效应, 难以模拟大功率微波器件遭受如空间强流电子束诱发的微放电现象,缺乏强流电子束诱发大功率微波器件的微放 电规律研究。

本文提出了一种利用电子枪提供空间电子作为种子电子开展微放电研究的实验方法,通过设计特殊波导,将 种子电子入射到特殊波导内,在波导内通入大功率微波信号,利用检波器和示波器分别检测透射和反射波形,观测 到电子诱发大功率微波器件发生微放电现象。

#### 1 理论计算

本研究以矩形波导作为微放电效应发生的器件对象,现从理论上对发生微放电现象需要的微波信号功率进行 计算,假设以两金属平板之间加*E*<sub>0</sub>sin(*ω*t+*φ*)射频微波信号发生微放电为例,计算微放电的阈值电压。

从电子运动方程着手,两平板间电子运动方程为

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = eE_0\sin(\omega t + \varphi) \tag{1}$$

式中:*m*为电子的质量,*e*为电子的电量,*x*为电子位移,*E*<sub>0</sub>为微波信号电场强度, $\omega$ 为微波信号角频率, $\varphi$ 为微波信号初始相位。电子在两金属平板微波信号(周期*T*)作用下,电子渡越时间需要满足微波半周期的奇数倍,即 *t* = (2*n*-1)*T*/2,其中*n*=1,2,3…,才会发生微放电现象,在上述时间段内对式(1)进行两次积分,即可求得两平板间的击穿电压

$$V = E_0 d = \frac{m(2\pi f d)^2}{e[(2n-1)\pi \cos\varphi + 2\sin\varphi]}$$
(2)

其中射频微波频率为 f(GHz),两平板间隙宽度为 d(mm)。 从式(2)可以看出,微放电阈值与微波信号的频率和表面间 隙尺寸之积(fd)有关。利用上述方程,结合实际测量结果, 建立计算机仿真模型进行计算,可得到不同材质平板间微放 电敏感曲线。图1 所示为欧洲航天局(ESA)通过计算模型得 到的微放电敏感性曲线,该阈值曲线是进行空间波导部件设 计时的重要参考标准。

对于频率 f 为 9.7 GHz 微波信号,特殊 X 波段矩形波导 结构尺寸宽边 a 设为 22.86 mm, 窄边 b 设为 1 mm, 通过矩形 波导 TE<sub>mn</sub> 和 TM<sub>mn</sub> 各模式的截止频率计算公式

$$f_{cTE_{m}} = f_{cTM_{m}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \tag{3}$$

得到前 5 个波导模式对应截止频率分别为: *f*<sub>cTE<sub>0</sub></sub> = 6.56 GHz, *f*<sub>cTE<sub>0</sub></sub> = 13.12 GHz, *f*<sub>cTE<sub>0</sub></sub> = 150.00 GHz, *f*<sub>cTE<sub>0</sub></sub> =6.56 GHz, *f*<sub>cTE<sub>1</sub></sub> = *f*<sub>cTM<sub>1</sub></sub> = 150.14 GHz和*f*<sub>cTE<sub>1</sub></sub> = 150.57 GHz, 其中 *c* 为光速。对于





为 f(GHz), 间隙宽度为 d(mm)

 $f_{cTM_u} = 150.14 \text{ GHz}$ 和 $f_{cTE_u} = 150.57 \text{ GHz}$ ,其中c为光速。对于频率为9.7 GHz的微波信号在该矩形波导结构尺寸a和b下,将仅以 TE<sub>10</sub>单一基模传输,不存在其他高阶模式。

对于矩形波导 TE<sub>10</sub>模式,矩形波导内的电场方向垂直于长边,因而发生微放电对应的两金属平板的间距则为 b,因而 fb 约为 10 GHz·mm,根据微放电的电压阈值与微波信号的频率和部件间隙尺寸的关系,对于铜波导材料, 从图 1 可以看到,发生微放电最低间隙电压值 V<sub>th</sub> 约为 900 V,则电场强度 E<sub>m</sub> 为

$$E_{\rm m} = V_{\rm th}/b = 900 \, \rm kV/m$$
 (4)

再根据 TE10 模矩形波导内脉冲功率容限计算公式

$$P = \frac{ab}{480\pi} E_{\rm m}^2 \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2}$$
(5)

将 a、b、E<sub>m</sub>、f代入上述公式,得到矩形波导中 TE<sub>10</sub>模微放电阈值功率 P<sub>th</sub>为 9.03 kW,因而对于上述结构尺寸的特殊 X 波段矩形波导,发生微放电效应的微波峰值功率需大于 9.03 kW。下面将采用中心频率为 9.7 GHz,带宽为 100 MHz,峰值功率 10 kW 的 X 波段微波源对该电子诱发矩形波导微放电进行实验验证。

#### 2 实 验

本实验利用电子束诱发大功率特殊波导微放电实验布局示意图如图 2 所示,通过设计特殊矩形压缩波导,在 特殊矩形压缩波导两端设置密封窗,并在特殊矩形压缩波导上开微孔,利用真空系统对特殊矩形压缩波导抽真空, 实验时在特殊矩形波导结构内通入大功率微波信号,当电子枪发射的电子束提供种子电子,诱发特殊压缩波导结 构发生微放电,通过正反向波形检测法检测微放电现象,具体是利用双定向耦合器的正向耦合部分微波源输出的 初始微波信号和定向耦合器耦合部分透射微波信号,初始微波信号和透射微波信号都分别经过衰减器和检波器输 入示波器,同时双定向耦合器的反向耦合部分反射微波信号,反射微波信号经过衰减器和检波器输入功率计,通过 示波器对比初始微波信号波形和透射微波信号波形,以及功率计监测反射微波信号的功率来判决是否发生微放电 现象。



#### 图 2 实验布局简图

#### 2.1 实验装置

首先利用 HFSS 软件,设计实验专用 X 波段特殊矩形压 缩波导,内径宽边 a 为 22.86 mm, 窄边 b 为 1 mm,压缩段长 54.5 mm,矩形波导压缩段的一侧宽边中心开 \$ mm 孔,用于 电子入射,矩形压缩波导两端对称线性延长放大,直至形成 X 波段 BJ100 标准波导(宽 22.86 mm×窄 10.16 mm),两侧放 大段波导长度均为 64 mm,在 BJ100 标准矩形波导一侧窄边 中心开 \$6 mm 孔,用于抽真空,特殊矩形波导结构仿真模型 如图 3 所示。所用电子枪为热阴极电子发射模式,电子枪提



Fig. 3 Structural model of the X-band waveguide transformer 图 3 X波段特殊波导

供电子束能量 30 keV, 流强 30 mA, 束斑大小为 φ5 mm; 大功率微波源性能参数如表 1 所示, 真空系统采用机械泵和 分子泵二级抽气。波导环形器, 定向耦合器, 衰减器和检波器均为 X 波段标准器件, 环形器隔离度为 20 dB, 定向 耦合器耦合度为 30 dB, 波导密封窗介质材料为聚四氟乙烯; 衰减器为 SHX 公司 SMA 系列标准衰减器, 平均功率 阈值 2 W, 峰值功率阈值 0.5 kW; 检波器功率阈值 20 mW; 功率计为 ROHDE&SCHWARZ, 探测功率范围 1 nW~

#### 表1 大功率微波源性能参数

Table 1 Parameters of high power microwave source

operating frequency/GHz	frequency bandwidth/MHz	peak output power /kW	microwave pulse output width/µs	duty cycle/%
9.7	100	10	1	0.1

100 mW; 示波器采用 1 GHz 采样率的 RIGOL DS 5152CA 示波器。

#### 2.2 实验步骤

第一步,利用矢量网络测试仪分别测试实验布局图中环形器、双定耦、特殊矩形压缩波导、波导密封窗和定向 耦合器等微波器件的插损、耦合度和隔离度等参数。

第二步,利用各部件和仪器搭建如图2所示的实验链路,对特殊矩形压缩波导和电子枪先抽真空,待真空度稳定,打开微波源,利用示波器和功率计观测反射和透射波形及功率并记录。

第三步,打开电子枪,调节电子枪灯丝电压和加速电压,发射电子束,利用示波器和功率计观测反射和透射波 形及功率计并记录实验数据,并与之前未发射电子束情况下反射和透射波形和功率进行对比,记录实验结果。

#### 2.3 实验结果

利用各部件和仪器,按照图2所示搭建实验链路,示波器1通道和2通道分别连接双定向耦合器的正向耦合端和定向耦合器的耦合端,功率计连接双定向耦合器的反向耦合端,实验现场如图4所示,对特殊波导和电子枪先抽真空,真空度达到2.6×10<sup>-3</sup> Pa,开始实验。



Fig. 4 Picture of experimental layout 图 4 微放电实验布局图

实验首先打开微波源, 通入如表 1 设定的微波参数, 观 测透射和反射微波波形, 传输波形如图 5 所示, 图中蓝色波 形为输出波形, 黄色波形为输入波形, 通过观察发现微波信 号传输正常, 透射波形和输入波形一致; 之后打开电子枪, 电 子枪灯丝加 7.7 V电压, 当加速电压逐渐增大, 达到 200 V 时, 通过示波器观测到微波信号受到干扰, 透射波形出现 截止现象, 如图 6(a)所示。当增大电子枪加速电压, 最大达 1000 V时, 透射微波信号截止明显提前, 脉宽变窄, 如图 6(b) 所示, 此时观察电子枪灯丝的电流约为 25 mA。同时通过功 率计观测反射信号波形, 观测结果如图 7 所示, 可以看到当 发生放电时, 反射功率增大, 最大增加幅度达 10 dB。



Fig. 5 Comparison of the transmission waveform and incident waveform without the electron emission 图 5 透射波形对比图

通过透射波形和反射波形可以看到,当电子枪灯丝加载电压时,在加速电压作用下,出现严重的放电现象,透 射波形脉冲宽度只有原来脉冲宽度的 20% 左右,反射功率增大约 10 dB,说明电子枪提供的种子电子能够诱发特









Gate 1 100.000 ns 900.000 ns A ∆T 800.000 ns (b) with the electron emission

VBU

Full

Config

Pos Sea

1 2

Fig. 7 Comparison of the reflected waveform without or with the electron emission 图 7 反射波形放电前后对比图

殊微波部件发生明显微放电现象。

#### 结 3 论

本文提出了一种利用电子枪提供空间电子作为种子电子开展微放电研究的实验方法,并对这一方法开展了实 验验证。验证实验采用设计特殊矩形波导和 X 波段峰值功率 10 kW 的微波源, 电子枪提供种子电子入射到特殊矩 形压缩波导腔内,通过对比电子束入射特殊波导前后的透射和反射波形的方法。实验发现当电子枪提供的种子电 子入射到特殊矩形波导腔内时,透射微波信号出现明显的截止现象,改变电子入射能量,观测到不同程度的微放电 现象,人射电子能量越大,信号截止越早,反射功率增大,微放电现象越明显。实验证明了电子枪提供种子电子诱 发微波器件发生微放电方法的可行性,该微放电效应实验方法为微波器件微放电机理研究提供了重要手段。

致 谢 衷心感谢中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家重点实验室对本工作给予的指导。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Shen Fazhong, Wang Xinbo, Cui Wanzhao, et al. Nonstationary statistical theory for single-surface dielectric multipactors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2): 433-437.
- [3] 李韵, 封国宝, 谢贵柏, 等. 大功率铁磁性微波部件微放电演变机理与抑制[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 063002. (Li Yun, Feng Guobao, Xie Guibai, et al. Multipactor evolution and suppression in high-power ferromagnetic components [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 063002)
- [4] Vaughan J R M. Multipactor [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, 35(7): 1172-1180.
- [5] Shemelin V D. Multipactor discharge in a rectangular waveguide with regard to normal and tangential velocity components of secondary electrons[R]. SRF010322-03, 2001.
- [6] Greenblatt M H. A microwave secondary electron multiplier [J]. Review of Scientific Instruments, 1949, 20(9): 646-650.
- [7] Geng Rongli, Padamsee H, Shemelin V D. Multipacting in a rectangular waveguide [C]//Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conference. 2001: 1228-1230.
- [8] Anderson D, Jordon U, Lisak M, et al. Microwave breakdown in resonators and filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(12): 2547-2556.
- [9] Gonzalez-Iglesias D, Perez A M, Anza S, et al. Multipactor in a coaxial line under the presence of an axial DC magnetic field [J]. IEEE Electron Device Letters,

2012, 33(5): 727-729.

- [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] 刘敏, 王晓天, 鲁帆, 等. 典型星载螺旋天线的大功率微放电效应仿真分析及试验研究[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(1):55-60. (Liu Ming, Wang Xiaotian, Lu Fan, et al. The high power multipactor on typical satellite-borne helix antenna[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(1): 55-60)
- [12] Woode A, Petit J. Investigations into multipactor breakdown in satellite microwave payloads [J]. ESA Journal, 1990, 14(4): 467-478.
- [13] Semenov V E, Zharova N, Udiljak R, et al. Multipactor in a coaxial transmission line. II. Particle-in-cell simulations [J]. Physics of Plasmas, 2007, 14: 033509.
- [14] ESA-ESTEC. Space engineering: multipacting design and test[R]. Noordwijk: ESA Publication Division, 2003.
- [15] 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.)
- [16] Cui Wanzhao, Li Yun, Yang Jing, et al. An efficient multipaction suppression method in microwave components for space application [J]. Chinese Physics B, 2016, 25: 068401.
- [17] 李韵, 崔万照, 张洪太, 等. 星载大功率复杂微波部件微放电效应数值模拟[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(2): 73-80. (Li Yun, Cui Wanzhao, Zhang Hongtai, et al. A novel simulation method of multipactor in complex component for satellite application[J]. Chinese Space Science and Technology, 2017, 37(2): 73-80.)
- [18] Geng R L, Goudket P, Carter R G, et al. Dynamical aspects of multipacting induced discharge in a rectangular waveguide[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, 538(1/3): 189-205.
- [19] 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)
- [20] Anza S, Vicente C, Gil J, et al. Experimental verification of multipactor prediction methods in multicarrier systems [C]//Proceedings of the 46th European Microwave Conference. 2016: 226-229.
- [21] Puech J, Lapierre L, Sombrin J, et al. A multipactor threshold in waveguides: theory and experiment [C]//Proceedings of NATO Advanced Research Workshop on Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission. 2005: 305-323.