



★ ★ ★
“十四五”时期

国家重点出版物出版专项规划项目·重大出版工程



空间科学与技术研究丛书

航天器微波部件 微放电检测技术

DETECTION TECHNOLOGY OF MULTIPACTOR IN
SATELLITE MICROWAVE COMPONENTS

魏 焕 崔万照 李砚平 马伊民 王新波 孙勤奋 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

航天器微波技术向着大功率、小型化方向发展,微波部件处于大功率工作状态时易发生射频击穿现象,导致微放电发生。由于微波部件微放电阈值不仅与设计相关,还与实际工艺密切相关,为确保航天器可靠工作,需对微波部件开展微放电检测试验。本书介绍了航天器微波部件微放电检测技术,详细介绍了微放电检测技术研究进展,微放电设计验证方法,微放电检测标准、检测技术及最新研究进展与研究方向。

本书面向航天领域一线科研人员、相关高校及研究院所的相关研究人员和高校专业学生,既可用于专业领域内人员作为研究查阅,也可作为高校相关专业学生的参考书籍。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天器微波部件微放电检测技术 / 魏焕等编著. --
北京:北京理工大学出版社, 2023. 1
ISBN 978 - 7 - 5763 - 2040 - 4

I. ①航… II. ①魏… III. ①航天器—微波元件—放
电—研究 IV. ①V441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2023) 第 007861 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 12

彩 插 / 6

字 数 / 222 千字

版 次 / 2023 年 1 月第 1 版 2023 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 59.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

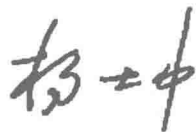
序 言

仰望星空，我们的征途是星辰大海；探索浩瀚宇宙，是人类千百年来
的美好梦想，古往今来，中国人从未停止对宇宙的探索。从 1970 年我国
第一颗人造卫星载着《东方红》响彻太空，到如今嫦娥五号“月球挖土”
实现了中国探月绕、落、回三步走，中国航天事业一步一步开启了崭新的
篇章。

随着中国空间技术的发展，航天重大工程和型号任务的实施也会遇到
一系列的技术难题，微放电击穿就是其中之一。在极端情况下，微放电击
穿能够对飞行器上的微波通信系统造成永久性损伤，这种损伤在发射之后
是不可能
在轨修复或更换的。本书的作者作为航天工程的一线研究人员，
以其深厚的理论功底和丰富的工程实践经验撰写此书。此书涉及微放电击
穿的物理机理、微波部件微放电设计验证分析、微放电检测基本原理与方
法及其国内外检测标准，分析了微放电检测研究进展，是工程实践与理论
分析紧密联系的科技图书。

阅读过程中，体会到本书没有枯燥的理论叙述，全是围绕微放电击穿
问题从产生机理、设计分析与试验检测技术来介绍，有很强的实用性、可
用性及可操作性。目前，大功率微波部件必须开展微放电试验检测。

从事航天研究大半辈子，我个人认为中国要从航天大国迈向航天强国，要特别加强像这样的基础理论研究，深入理论指导工程实践，结合理论分析与检测研究，从根本上找出微放电击穿的问题源头，才能提出一套切实可行的解决方案，建立完善的微放电击穿分析与检测方法，指导部件设计与工程试验。我深知撰写这样一本书籍所要花费的时间与精力，本书的作者都是航天工程的一线研究人员，有些还是从事大半辈子试验检测的研究人员，他们能在繁重的科研任务和型号任务之余完成这本书，实属不易！相信读者在阅读本书的过程中，不仅能学到微放电击穿的相关专业知识，也能感受到作为航天一线人员的作者希望把其所了解和掌握的理论知识与实践经验记录下来，和大家分享殷切之心，能够感受到艰苦奋斗、勇于攻坚、开拓创新的航天精神。希望更多像作者一样的有心人愿意将自己的理论知识和丰富的实践经验分享给大家，让后来从事这方面工作的工程技术人员，以及相关专业的师生能够得到帮助，助推我国航天事业以及空间技术的后续发展。



中国工程院院士

前 言

空-天-地一体化通信将成为未来移动通信的重要特征,借助航天器进行通信、导航、遥测等服务已经成为科学探索的重要方式,进一步改变着人们的生活方式,而航天器有效载荷大功率微波系统仍是关键环节。随着下一代航天器载荷技术向更高功率、更多通道数、更小尺寸发展,航天器微波部件发生微放电的可能性大大增加。航天器有效载荷中的大功率微波部件如输出多工器、滤波器、开关矩阵、天线馈源等,由于结构复杂,如果设计的微放电阈值电平不高,或者防护措施做得不够,就很容易发生微放电。借助微放电仿真设计验证方法可对航天器在轨环境进行分析和验证,减少反复设计,避免长周期的地面试验,但是鉴于实际大功率部件微放电影响因素复杂且航天器高可靠性要求,在轨飞行件必须开展微放电检测试验。

本书介绍了微放电效应,指出了航天器微波部件开展微放电检测的必要性,围绕微放电检测技术,介绍了国内外微放电检测研究进展和微放电设计验证方法,总结了微放电检测的关键问题,针对种子电子详细分析了微放电试验用种子源,最后介绍了微放电检测技术最新进展。本书面向航天领域一线科研人员、相关高校、科研院所的相关研究人员和高校专业学生,既可用于专业领域内人员作为研究查阅,也可作为高校相关专业学生

的参考书籍。

本书共6章,由魏焕、崔万照、李砚平、马伊民、孙勤奋、王新波、张雨婷、杨兆伦编写,全书由魏焕统稿。魏焕负责全书章节的编写与校对工作,其中崔万照、孙勤奋参与第1章、第2章的编写,马伊民、张雨婷、杨兆伦参与第3章和第6章的编写,李砚平、马伊民参与第4章的编写,李砚平、王新波参与第5章的编写,崔万照、王新波参与第6章的编写。

中国工程院院士杨士中在百忙之中为本书撰写了序言,并提出了许多宝贵意见。本书的研究工作得到重点实验室基金项目(编号:6142411112101、6142411191103、6142411191104、6142411191105)、国家自然科学基金(编号:61901361、51827809、62101434、61901360)资助。本书的出版得到国家出版基金项目资助,并获得“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目·重大出版工程项目支持。本书还得到了中国空间技术研究院西安分院原院长李军、书记沈大海、院长谭小敏、副院长李立、实验室副主任李小军等的关心和支持;感谢双龙龙、王海林、王保新、郭鲁川、彭璐、胡少光、周少杭、田源等在大功率微放电测试方面的专业支持,感谢课题组胡天存、王瑞、张娜、白鹤、何鋈、王琪、陈翔、杨晶、苗光辉、谢贵柏为微放电做了大量工作;感谢北京优诺信创科技有限公司余涛总经理等与中国空间技术研究院西安分院殷新社、孙勤奋、李砚平、柏潇、李登辉、左刚等在多载波微放电检测平台开发研究中所做出的工作。本书在撰写和编辑过程中,得到了北京理工大学出版社编辑的精心校阅,特别是得到了陈莉华、李颖颖编辑的多次交流与指导。在此一并表示感谢。

科技发展与日俱进,技术进步突飞猛进,作者在编写全书的过程中虽穷尽十年之研究,始终未能完全覆盖微放电检测技术研究的方方面面。同时,随着检测手段的发展,微放电检测技术必将取得更大的发展。虽然我们竭尽全力,但受限于水平和能力,难免有一些疏漏和不足之处,恳请广大读者和专家批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 微放电的概念	1
1.1.2 微放电产生的条件	1
1.2 微放电检测技术研究背景	7
1.2.1 微放电的危害	7
1.2.2 微放电试验验证的必要性	8
1.2.3 微放电研究趋势	10
1.3 微放电检测研究进展	12
1.4 小结	14
第 2 章 微放电设计验证方法	15
2.1 概述	15
2.2 微放电仿真设计方法	16
2.2.1 微放电敏感曲线	16
2.2.2 电磁粒子联合仿真软件	17

2.3	二次电子发射	18
2.3.1	二次电子发射的概念	18
2.3.2	二次电子发射特性的测量	22
2.3.3	影响二次电子发射系数的因素	25
2.4	微放电设计验证方法	37
2.5	小结	40
第3章	微放电检测标准	41
3.1	概述	41
3.2	微放电试验目的	42
3.3	国内外微放电检测标准	42
3.3.1	我国微放电检测标准	43
3.3.2	欧洲微放电检测标准	50
3.3.3	美国微放电检测标准	63
3.4	小结	71
第4章	微放电检测方法	72
4.1	概述	72
4.2	检测基本条件	72
4.2.1	检测输入信号	72
4.2.2	非辐射型检测与辐射型检测	75
4.2.3	检测初始电子源	79
4.3	微放电检测基本原理	80
4.3.1	微放电引起谐波分量	80
4.3.2	微放电引起多载波信号互调分量	83
4.3.3	微放电引起信号近载波噪声变化	84

4.3.4 微放电引起信号相位变化	85
4.4 微放电检测方法选择	88
4.4.1 微放电局部检测法	89
4.4.2 微放电全局检测法	92
4.4.3 微放电检测方法总结	100
4.5 小结	102
第5章 微放电检测试验的电子源	103
5.1 概述	103
5.2 航天器空间环境	104
5.3 微放电试验种子电子源	105
5.3.1 辐射源	106
5.3.2 紫外光源	112
5.3.3 电子枪	121
5.4 微放电种子电子源对比	124
5.4.1 理论分析	124
5.4.2 试验分析	125
5.5 小结	129
第6章 微放电检测研究进展	130
6.1 概述	130
6.2 多载波微放电检测	130
6.2.1 多载波微放电检测的研究现状	131
6.2.2 多载波微放电的等效单载波验证方法	134
6.2.3 多载波微放电的直接验证方法	135
6.3 毫米波微放电检测	147

6.3.1	毫米波微放电发生机制和理论建模研究	147
6.3.2	基于准光腔结构的毫米波微放电效应关键因素试验诊断研究	149
6.4	小结	156
	参考文献	157
	索引	170

第 1 章

绪 论

1.1 概述

1.1.1 微放电的概念

随着气压下降，气体的密度降低，气体分子之间的距离变大，电子的平均自由程也随之增大，电子碰撞电离损失随之减小，在射频电磁作用下电子从电场加速中可获得更高的能量，从而引发二次电子倍增放电现象，微放电就是典型的二次电子倍增放电现象。微放电也称为二次电子倍增效应，是指部件处于 1×10^{-3} Pa 或更低压强时，电子在外加电磁场的加速下，在金属表面或介质表面上发生的谐振放电现象。

1.1.2 微放电产生的条件

根据微波部件表面材料成分与结构的不同，微放电效应有多种形式，典型的微放电现象有：①金属谐振结构中的双表面微放电；②包含介质结构的单表面或金属与介质混合的介质微放电。

对于真空环境，电子在电磁场中运动时，平均自由程往往大于微波部

件中电磁场强度最大区域的最窄间距。因此，当电子以一定能量和角度与微波部件碰撞时，将发生二次电子发射（Secondary Electron Emission, SEE），若碰撞时发射的二次电子数量总是大于碰撞吸收的电子数量，且发射的二次电子总能跟上电磁场的相位变化频率，不断获得能量与加速，则发生电子雪崩效应，即所谓的微放电效应，此时电子数目随时间呈指数增长，如图 1-1 所示。

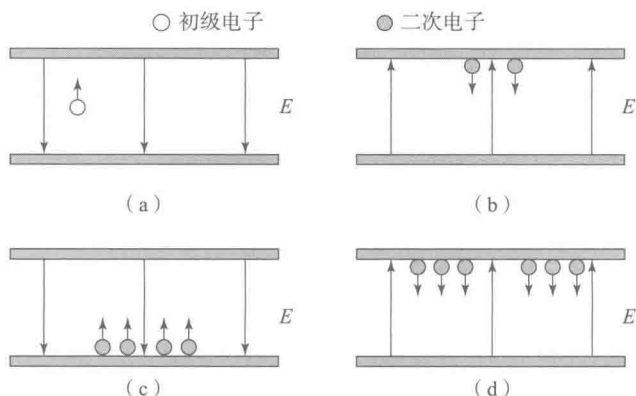


图 1-1 双金属表面微放电发生过程示意图

- (a) 初级电子在电场作用下加速；(b) 初级电子碰到器件表面产生二次电子，并在反向电场作用下向器件另一侧内壁运动；(c)、(d) 二次电子在反向电场作用下再次碰到器件表面产生二次电子，直到发生电子雪崩

对于介质微波部件而言，考虑到介质表面电荷积累，微放电过程比金属微放电复杂得多。当电子碰撞到介质材料表面时，如果出射电子少于入射电子，如图 1-2 (a) 所示，则在介质材料表面积累负电荷；如果出射电子多于入射电子，如图 1-2 (b) 所示，则在介质材料表面积累正电荷，经过一段时间后介质材料表面会积累大量正电荷。介质材料表面带电不仅对二次电子发射物理过程产生影响，同时影响出射电子在空间中的运动轨迹，因此介质微放电是一个复杂的耦合作用过程。

由上述过程可知，理想条件下微放电效应的建立，需要满足以下几个条件。

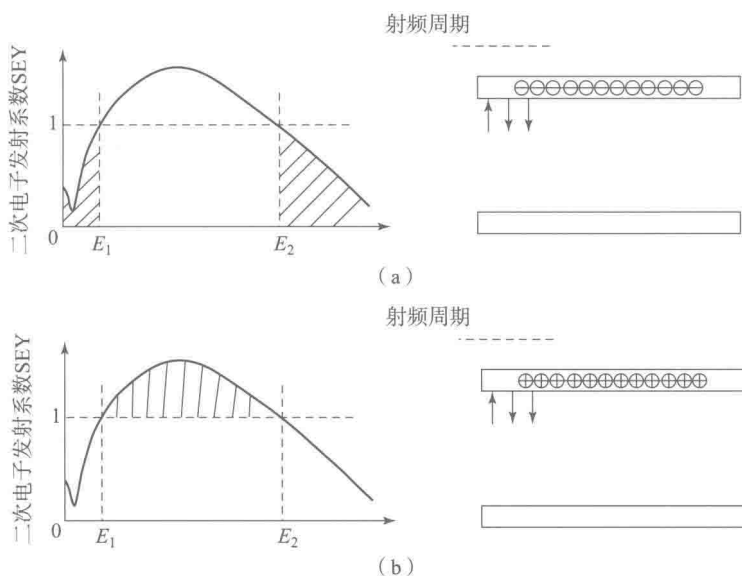


图 1-2 介质材料表面带电原理示意图

(a) 介质带负电荷；(b) 介质带正电荷

[注：图中 E_1 、 E_2 为二次电子发射系数等于 1 时入射电子第 1 和第 2 能量点
(射频周期作用积累下的效果)]

1.1.2.1 真空条件

微放电发生的基本条件之一是电子的平均自由程足够长，使得电子在微波部件中发生两次碰撞之间加速时与周围的原子或分子碰撞的概率很小。电子的平均自由程是电子与气体分子相继发生两次碰撞之间所运动的平均路程。在标准大气压 (101.3 kPa) 和室温 (298 K) 条件下，忽略空气中稀有气体和其他组分，只考虑空气中气体组分 79% 的氮气与气体组分 21% 的氧气，电子的平均自由程计算公式如下：

$$\lambda = \frac{k_B T}{\pi r^2 P} \quad (1-1)$$

式中， k_B 为玻尔兹曼常数，取值为 1.38×10^{-23} J/K； T 为气体的温度环境 (K)； r 为气体分子的半径 (m)； P 为当前的气体压强 (Pa)，可以计算出与大功率微波部件尺寸相当的分米级电子平均自由程的气压 P 不大于

10^{-3} Pa, 即我们常规定的微放电试验要求真空度不大于 10^{-3} Pa。

可以看出, 对于不大于 10^{-3} Pa 的气压下, 电子的平均自由程在 10^{-1} m 量级, 与微波部件尺寸可比拟, 满足微放电发生的必要条件。

1.1.2.2 自由电子源

要产生微放电, 需要有初始电子源, 可能的源有以下几种。

1. 自由电子

在低地球轨道上 (1 000 km 以下), 有很多自由电子源, 可以达到较大电子密度, 其中包括太阳电磁辐射、太阳热辐射、带电粒子辐射、电离层等, 在 750 km 的高度以上, 电离层电子的密度一般可以从 $10^8/\text{m}^3$ 开始变化, 根据太阳活动和卫星位置而不同, 诱发卫星环境产生污染、静电等变化, 如图 1-3 所示, 辐射等可穿透卫星, 引发微波部件内自由电子。

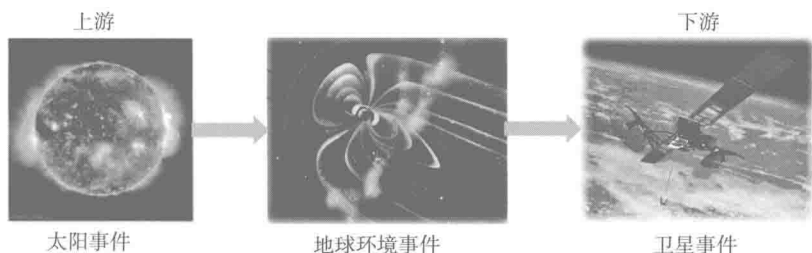


图 1-3 太阳事件引发卫星事件过程示意图 (见彩插)

2. 场发射

如果导体表面的电场强度足够, 而且电场的方向是使电子加速离开表面的, 那么表面的势垒便会很窄, 有可能产生电子隧道。尽管要达到足够的电流密度需要极高的场强 ($10^9 \sim 10^{10}$ V/m), 但是表面的不规则性、表面的氧化和尘垢污染可以在极低的场强下使得发射显著增强。研究发现, 被擦伤的铝表面就有场发射的可能性, 对于这种材料来说, 就不需要有额

外的自由电子。

3. 光电发射

这里包括外界的电磁辐射和粒子辐射所产生的电子。

4. 航天器排气

航天器上所用电缆的非金属外皮、黏结剂、热控涂层和填料等，在真空状态下会因扩散和脱附作用放气，并产生质量损失，其中一部分可能在较冷的表面重新凝结，并对航天器设备造成污染。这种污染往往会长期残留在航天器附近，这些分子容易被光电发射产生的电子电离，从而提供引起微放电的自由电子。

1.1.2.3 材料的最大二次电子发射系数大于1

微放电效应发生的一个基本条件是材料的二次电子发射系数最大值大于1。如表1-1所示，常用的典型航天材料的最大二次电子发射系数均大于1。二次电子发射系数不仅与材料有关，而且与初级电子入射能量有关，而初级电子的入射能量取决于外加射频信号的功率以及初级电子在两次碰撞之间获取的能量。因此，当外加射频信号的功率较小时，初级电子的入射能量较低，无法激发较多数量的二次电子，微放电效应难以建立。当外加射频信号功率非常大时，初级电子的入射能量较高，穿入表面很深，以至于产生的二次电子被材料内部分子、原子捕获而无法到达表面，无法激发足够的二次电子发射，因此外加射频信号的功率必须在一定范围内才能激发微放电效应。

表1-1 典型材料的最大二次电子发射系数 σ_{\max}

材料	Al_2O_3	BeO	CsI	Ag	Cu	Fe	W	Pt	Pd
σ_{\max}	4	3.4	20	1.5	1.3	1.3	1.4	1.8	1.3

1.1.2.4 二次电子的渡越时间是微波信号半周期的奇数倍

微放电发生的最后一个条件为从材料表面出射的二次电子的渡越时间

应当是微波信号半周期的奇数倍（1倍、3倍、5倍等，即1阶放电、3阶放电、5阶放电等，目前常用微波频段与功率条件下出现1阶放电，毫米波和太赫兹频段更容易出现高阶放电），使得出射的二次电子在电磁场的作用下总能够获得加速并进行下一次的碰撞，持续发生电子谐振倍增。但是，近年来关于单边微放电和多载波微放电的研究表明，在特定条件下在足够长的单周期内也有可能发生微放电。因此，需要注意的是：该必要条件在特定条件下不再成立。航天器大功率微波部件均满足以上微放电效应建立的条件，极易发生微放电效应，涉及通信、导航和遥感卫星等航天器。

根据微放电传统分析理论，微放电阈值与微波信号的工作频率和部件间隙尺寸之积（ $f \times d$ ）紧密相关。平行板间的微放电阈值与 $f \times d$ 的关系如图1-4所示，可以看出 $f \times d$ 越小，微放电阈值越低，尤其在低频段，即使 d 很大，微放电阈值仍很低，微波部件在很小的功率条件下就会发生微放电效应。

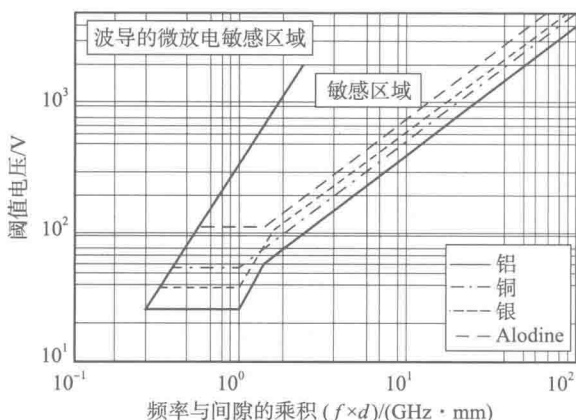


图1-4 平行板间的微放电可能发生区域

1.2 微放电检测技术研究背景

1.2.1 微放电的危害

随着下一代航天器微波部件向更高功率、更多通道数、更小尺寸发展,航天器微波部件发生微放电的可能性大大增加。航天器有效载荷中的大功率微波部件如输出多工器、滤波器、开关矩阵、天线馈源等,由于结构复杂,如果设计的微放电阈值余量或者防护措施做得不够,就很容易发生微放电;一旦发生微放电,将会使得微波传输系统驻波比增大、反射功率增加、系统噪声增加,甚至损坏部件,从而使系统不能正常工作,造成很大的损失。

当空间设备中发生微放电时,通常会损害系统设备,造成系统不能正常工作,典型的部件发生微放电的损坏情况如图1-5所示。图1-5(a)中同轴滤波器内腔介质谐振杆出现放电,图1-5(b)中铁氧体环形器内部出现间隙微放电,图1-5(c)中微带电路同轴接头焊接处出现放电,图1-5(d)中天线外观无明显异常,拆开天线发现其内导体镀金层已局部发黑,周围聚四氟乙烯介质已局部烧毁。

一般情况下,常见的微放电危害具体表现在以下五个方面。

(1) 使谐振类设备失谐,导致所传输的微波信号失调。

由于微放电实际上是一种高度非线性的,且随时间变化,这种效应会引起谐振腔的 Q 值、耦合参数、波导损耗和相位常数等的波动,不可避免地使系统失调,导致系统性能下降。

(2) 导致金属内部气体逸出,产生更严重的气体放电。

发生微放电以后,便会使设备排气。如果这种气体不用适当的方法排除,就会产生气体放电。气体放电会释放比微放电更多的能量,导致部件