



国之重器出版工程  
国防现代化建设

空间科学与技术研究丛书


## Multicarrier Multipactor Analysis for Space Microwave Components

# 空间微波部件 多载波微放电分析

王新波 崔万照 张洪太 刘纯亮 冉立新 著

# 空间微波部件多载波 微放电分析

王新波 崔万照 张洪太 刘纯亮 冉立新 著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书结合中国空间技术研究院西安分院、西安交通大学和浙江大学等单位近年来在多载波微放电效应方面的工程实践和研究成果,介绍了多载波微放电的相关概念和理论基础,针对多载波微放电重点介绍了统计理论、粒子模拟、等效单载波快速计算以及“最坏状态”全局优化等分析方法的最新研究进展,较为全面地介绍了我国在多载波微放电分析及实验方面的最新成果,具有指导性和启发性。

本书主要面向从事航天器有效载荷大功率微波部件研发的工程技术人员,亦可作为相关领域研究人员的参考资料,或作为高等院校航天相关专业研究生的教学参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

空间微波部件多载波微放电分析 / 王新波等著. —北京:北京理工大学出版社, 2020. 6

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8253 - 6

I. ①空… II. ①王… 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 (2020) 第 046341 号

---

出 版 / 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)68948351(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 / 固安县铭成印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 11.5

彩 插 / 6

字 数 / 202 千字

版 次 / 2020 年 6 月第 1 版 2020 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 46.00 元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

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

我国航天事业已经实现了以“东方红一号”、载人航天、月球探测及北斗导航等为代表的一系列工程实践，目前正处于从航天大国迈向航天强国建设的重要时期。有效载荷技术作为航天科技进步中最为重要的一部分，其发展日新月异，我们要建设航天强国，其中一个很重要的方面就是要在现有技术水平的的基础上，瞄准前沿、深挖基础，大力开展应用基础研究，进一步夯实我们建设航天强国的基础。

随着我国航天器朝着更大容量、更高传输速率、更多通道的方向发展，面临很多的基础问题。而之前我们更多的是在参考国外经验的基础上进行相关的系统论证、设计和试验。而随着我国航天技术的发展，很多技术已经和国外持平、局部甚至领先，一些制约系统性能提升的基础问题，国外要么不公布相关成果，要么也处于研究阶段。如此一来，我们在很多方面就面临缺乏参照和借鉴的境地。在这种情况下，开展应用基础研究对航天强国建设就显得尤为重要。

微放电效应就是制约航天器大功率微波部件功率容量提升的瓶颈基础问题，微放电一旦发生，轻则会使得传输通道失配，严重时会使微波部件烧毁，导致航天器整个系统失效。因此，微放电问题对航天器有效载荷大功率微波系统至关重要，其中，多载波微放电问题由于其产生原因的复杂性，多年来是航天器有效载荷领域的研究热点，国内外研究者均已形成了一定的理论研究成果，但是尚未有针对多载波微放电的著作发表。本书既有基础理论研究，又联系实际工程应用，其出版发行将填补国内空白。

本书主要围绕制约航天器有效载荷的大功率多载波微放电问题，而目前这



方面国外也正在进行研究，属于国内外并跑状态。本书对近年来在多载波微放电方面的研究成果进行了系统梳理，围绕多载波微放电概念、分析方法及试验方法进行详细介绍，对多载波微放电面临的问题和解决方案进行了全面的说明和阐述。从工程的角度围绕微放电的阈值预测、考核流程、试验验证等方面进行了深入介绍，是一本兼顾基础概念和工程实践的科技图书，具有系统性和新颖性，既能作为广大航天科技工作者了解微放电相关知识的查阅手册，又可作为空间大功率微波击穿研究人员的参考书籍。希望广大读者能够从本书中获得进行航天器微波部件设计的相关知识，相关从业人员能够从本书中得到帮助和启发，为建设航天强国贡献更多力量。

张厚源

中国工程院院士



## 序

人类历史的进步是不断探索、认知和超越的过程，而空间技术是探索、开发和利用太空以及地球以外天体的综合性工程，是高度综合的现代科学技术，承载着人类文明从地球向深空跨越的宏大梦想。同时，空间技术的应用也极大地带动和促进着社会文明的进步。当前，伴随空间开发与探索不断迈向更深、更高的层次，有效载荷作为航天器的核心关键组成，在其不断增长的需求中也呈现出新的特点与趋势。除了传统应用之外，近年来以天地一体化、低轨互联网星座和 6G 移动通信等新兴概念为牵引的商业航天发展如火如荼，航天领域正迎来新一轮的发展热潮。基于航天器工作环境及任务的特殊性，多通道、大容量、抗干扰及远距离通信等已成为航天器有效载荷技术发展的重要趋势，而足够的发射功率是支撑以上技术发展的必要条件。在此背景下，对航天器有效载荷微波系统的功率容量要求越来越高，随之而来的大功率可靠性问题逐渐凸显。

微放电 (Multipactor)，又称“二次电子倍增效应”，是微波系统在真空环境下所产生的一种放电击穿现象，一旦发生即可直接损坏微波器件，是航天器有效载荷所面临的一种重要的功率可靠性问题。微放电不但严重威胁飞行器的在轨安全，也成为制约未来航天器微波系统功率容量提升的重要障碍，成为影响航天器装备技术发展的重要瓶颈问题。

对微放电的精确分析预测可提前预判微波器件和系统的放电风险，为针对性的改进设计、实现微放电抑制及提升器件功率容量提供有效的支撑，同时可大幅降低繁琐复杂的测试实验验证所带来的高昂代价，对航天器微波部件的开发至关重要。微放电的分析预测涵盖计算电磁学、物理电子学、材料学等多个



领域，是融合多学科的综合性问题，是一项非常有挑战性的课题。经过全世界相关研究机构和人员在相当长时间内的研究积累，针对单载波微放电的分析和阈值预测已取得了显著进展，也有相应的经典理论和计算方法可依。然而，实际的大功率微波系统大多工作于多载波模式，单载波条件下的分析手段无法适用实际的多载波情形。为此，欧洲航天局针对多载波情形给出了“20个电子渡越时间”的等效方法，是在对多载波微放电缺乏深入研究的情况下给出的一种设计建议，对实际设计带来的偏差无法定量评估，业内普遍认为其偏于保守。

伴随理论研究的不断深入和数值仿真能力的不断增强，多载波微放电分析逐渐引起国内外空间微波技术从业者的广泛关注。我国科研人员以航天工程中的基础问题为导向，经过长期潜心钻研和艰辛付出，在多载波微放电分析领域取得了国际先进水平的研究成果。本书的作者们对其近年来在多载波微放电分析方面的研究成果进行系统整理，与广大航天从业者和大功率微放电的研究人员共勉，以期促进国内大功率微波部件的多载波微放电分析及设计水平。

全书围绕微放电在多载波条件下的特有问题的展开，重点介绍了多载波微放电的背景、分析方法和实验验证，对多载波微放电进行了系统深入的研究，给出了卓有成效的分析方法，是多载波微放电领域第一本较为系统全面的著作。书中内容涵盖了基础理论和工程应用，可以帮助相关研究人员和工程技术人员提升对多载波微放电的系统认知，对于研究和解决多载波微放电问题、促进航天器有效载荷大功率微波技术发展有着重要的现实意义。

同时，我也期盼更多的航天科研人员能够立足国家重大工程和重要科技前沿，瞄准实际问题与需求，在各自的研究领域潜心研究，积跬步至千里，积小流成江海，为加快建设我国航天强国的步伐贡献更多的智慧。

中国科学院院士，IEEE Fellow



## 序

我和本书的作者 2011 年相识于在西班牙召开的欧洲航天署在微放电方面的国际研讨会 (International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation), 这些年来我们一直保持着各种形式的学术交流, 彼此分享并探讨微放电理论方面的研究动态和最新进展。在我任职加拿大 COM DEV (康姆迪) 公司首席科学家和研发总监, 从事各类卫星通讯系统的微波滤波器、多工器等无源器件研发的 24 年间, 曾多次面临微放电问题的挑战。2007 年, 我在 IEEE Magazine 发表了一篇关于大功率滤波器设计文章<sup>①</sup>, 总结了各类大功率微波器件设计面临的挑战及解决方案。2017 年 10 月, 我开始到香港中文大学任教。2019 年, 我和本书的作者又在新加坡的亚太微波会议上 (2019 Asia – Pacific Microwave Conference) 合作撰写了一篇关于多载波微放电分析的文章, 并有幸作为分邀请报告进行宣讲。因此, 当本书作者邀请我为本书作序时, 我欣然接受。

区别于地面的大功率微波系统, 空间中的航天器工作在真空环境中, 电子的平均自由程足够长, 使得电子很容易被加速并且与周围原子或分子的碰撞几率很小, 从而极易引发一种在空间微波器件中经常会碰到的大功率击穿问题, 即二次电子倍增效应 Multipactor, 通常翻译为微放电。

一直以来, 微放电对于从事空间微波技术的工程师来说都是一件非常棘手

---

<sup>①</sup> M. Yu, “Power – handling capability for RF filters,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 8, no. 5, pp. 88 – 97, Oct. 2007.



的事，由于它涉及电子在射频电场中的运动以及材料的电子发射特性等物理电子学的相关概念，同时微波工程师也难于理解类似于电子云这种粒子加速器领域的专有名词，但是对它的危害很清楚，微放电能够导致传输的信号畸变，传输通道失配、反射增加，最为重要的是它能够局部加热并使微波器件表面出气，引发能够烧毁微波器件表面的电晕放电，严重时甚至使整个微波器件报废。因此，从大功率微波器件设计之初就需要特别关注微放电功率容量的问题。

近 20 年来，国际上在微放电的分析方面取得了长足进展。按技术路线主要分为两类：第一类是针对平行平板结构的解析模型，指出了间隙放电电压与频率和间隙乘积之间的依赖关系，这种情形代表了最为简单，也是最为恶劣的情况，其他实际微波器件都可以采用这一结构来等效，基于这一模型欧洲航天署开发了相关的微放电计算器（Multipactor Calculator）并制定了微放电设计及测试标准；第二类是近年来发展起来的以数值仿真为代表的对整个微放电过程的模拟研究，将整个微波器件的区域进行离散网格化，对电子在微波器件内部电磁场作用下的运动进行差分迭代，并辅以微波器件壁的二次电子发射特性，在微放电过程分析和阈值预测方面取得了良好的效果，近年来已有针对单载波情况介绍微放电数值模拟的著作面世。

而实际空间通信系统中，为了实现宽带范围内信号的线性放大，通常采用信道化的方案，首先对小信号进行分路处理，分别放大后采用输出多工器进行合成，因此大功率传输、发射均是多载波工作模式。在欧洲航天署的微放电设计及测试标准中，对多载波微放电推荐采用“20 个电子渡越时间”的建议，然而这主要是由于对多载波微放电研究不够深入而采用的保守方法，但在工业界广泛采用。近年来随着数值仿真能力的增强，对多载波微放电从电子演化的角度进行研究变得切实可行，从而逐渐揭开了多载波微放电的神秘面纱，本书正是沿着这一思路来向读者展示微放电在多载波情况下面临的问题、挑战及解决方案。

本书从多载波合成波形的特性入手，首先介绍了目前在行业内广泛采用的“20 个电子渡越时间”准则以及与之相对应的设计方法和考核流程，接着详细介绍了统计理论和数值仿真在多载波微放电方面的新进展，深入研究了多载波条件下微放电的演化过程，介绍了多载波微放电的等效单载波近似方法和多载波微放电“最坏状态”分析方法和具体实现过程，最后介绍了多载波微放电实验方面的最新进展。本书的选题契合行业需求，又具有重要的科学意



义和学术价值，其研究工作处于国内领先、国际先进水平。全书包含理论、仿真、实验，为读者全方位展示了目前多载波微放电的研究进展，对空间大功率微波技术从业者及航天技术参与者均具有较高的参考价值。

香港中文大学电子工程系教授  
加拿大工程院院士，IEEE Fellow  
ming.yu@ieee.org



## 前 言

地面通信网络和空间卫星通信的深度融合将成为未来移动通信的重要特征，空间卫星通信正逐步走入公众视野，而空间有效载荷的大功率微波系统仍将是信息传输和转发的重要途径之一。同时，以空间信息网为代表的空间基础设施对通信容量需求的急剧提升，要求不断增加卫星转发器的通道数和单个通道的功率容量，而多个通道的大功率信号需要通过微波部件实现合成、滤波并向地面大功率发射，因此空间微波系统面临多载波微放电击穿的严重风险。长期以来，由于对微放电的物理过程缺乏三维数值模拟的能力，使得对多载波微放电的研究进展缓慢，已有的电子渡越时间  $T_{20}$  设计准则是在对合成信号包络的幅度及其持续时间进行分析的基础上给出的，未涉及微放电的物理演化过程。近年来，随着计算电磁学和物理电子学的进展，逐步开发了一批基于粒子模拟（Particle in Cell, PIC）进行微放电演化过程数值仿真的代码和软件，同时得益于统计理论的长足发展，能够在考虑二次电子发射随机特性的情况下对微波部件的微放电演化过程进行动态分析和模拟，并逐渐扩展到多载波的情况，这两者都为多载波微放电分析提供了有效的计算和仿真工具。关于航天器微波部件微放电分析已经有著作问世，而目前还没有一本专门针对多载波条件下空间微波部件微放电分析、设计和实验的著作，本书正是在这一背景下孕育产生的。

本书对近年来中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家级重点实验室、西安交通大学和浙江大学等单位在多载波微放电研究方面的阶段性研究成果进行了系统梳理和总结，以多载波微放电为对象，围绕微放电基础理论、多载波合成波形特性、电子渡越时间  $T_{20}$  规则、多载波微放电统计理论、多载



波微放电数值模拟、多载波微放电“最坏状态”全局分析、多载波微放电实验验证等方面进行了系统的介绍和阐述，为读者详细介绍了多载波微放电在分析、设计及验证各个环节所面临的与单载波情况不同的特殊问题及解决思路。本书属于空间电子信息领域，主要面向目前正在从事或者将要从事空间有效载荷大功率微波技术研发的工程技术人员、总体设计人员以及相关高校及科研院所从事航天器微波技术领域研究的教师和研究生，既可作为专业领域人员的查阅手册，也可作为航天领域初涉者的参考资料。

本书共6章，由王新波、崔万照、张洪太、刘纯亮和冉立新撰写，全书由王新波统稿。王新波、崔万照负责第1章的撰写，王新波、张洪太负责第2章的撰写，冉立新、王新波负责第3章和第6章的撰写，王新波、刘纯亮负责第4章和第5章的撰写。

中国工程院院士张履谦研究员，中国科学院院士、IEEE Fellow 崔铁军教授，加拿大工程院院士、IEEE Fellow 于明教授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国家自然科学基金项目（编号：61801376、U1537211、11705142、51827809）、国家级重点实验室基金项目（2020SSFNKLSMT-02）、中国航天科技集团有限公司青年拔尖人才项目的资助。本书的出版得到“国之重器出版工程”支持。感谢我的博士生导师张小宁教授对我研究工作的悉心指导，本书是在本人博士期间研究工作的基础上，结合行业标准以及多载波微放电研究方面的最新进展进行扩展而成。本书的撰写和出版得到了中国空间技术研究院西安分院李军院长、沈大海书记、李立副院长、科技委宋燕平主任和空间微波技术国家级重点实验室李小军副主任、朱舸副主任、李琪副主任、李阿艳的关心和支持。本书的研究工作还得到了中国空间技术研究院西安分院殷新社研究员、孙勤奋研究员、夏亚峰研究员、李欣博士，西安交通大学李永东教授、贺永宁教授、曹猛教授、王洪广副教授，东南大学张剑锋副教授的悉心指导和帮助，感谢李砚平、双龙龙、王海林、王保新、郭鲁川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、张娜、王瑞、李韵、白春江、谢贵柏、封国宝、何鋈、陈翔、王琪、杨晶、魏焕、白鹤、张恒、苗光辉、宋强等在二次电子发射及微放电机理方面开展的大量基础性工作，为本书研究工作的开展提供了坚实理论基础，感谢王志宇、申建华、王静宇、宋庆庆、牟文秋、申发中、张斌、林舒、翟永贵等的辛勤工作和有益讨论。在本书撰写和编辑过程中，得到了北京理工大学出版社的精心校阅，在此一并表示感谢。

由于本书是作者所在团队对近年来研究工作及成果的阶段性总结，在多载波微放电方面后续还需要开展大量深入、细致的研究工作，受限于对本领域的认知水平和作者的能力，难免有不足之处，恳请广大读者和专家批评指正。

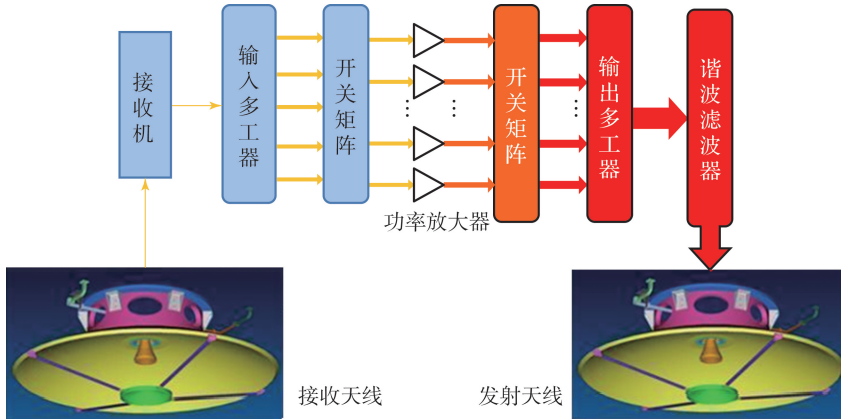
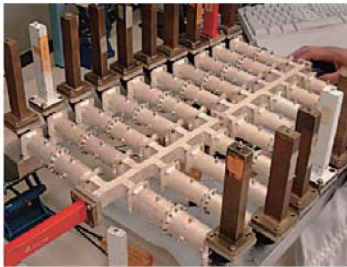


图 1-3 典型通信卫星原理框图



(a)



(b)



(c)

图 1-4 工作于多载波模式的大功率微波部件

(a) 输出多工器<sup>[46]</sup>; (b) 谐波滤波器<sup>[47]</sup>; (c) 天线馈源<sup>[48]</sup>

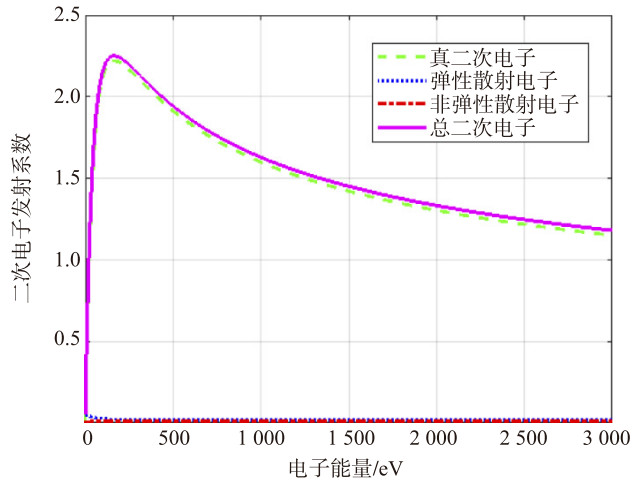


图 1-9 基于 ESA 给定的银材料拟合 Furman 模型的二次电子发射系数<sup>[31]</sup>

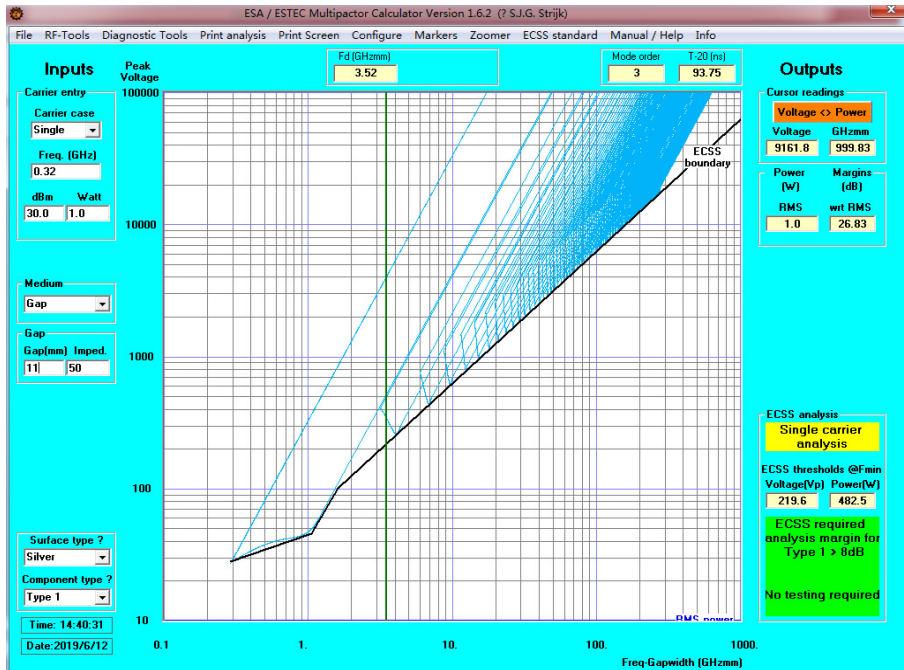


图 1-13 ESA 微放电计算器主界面<sup>[69]</sup>

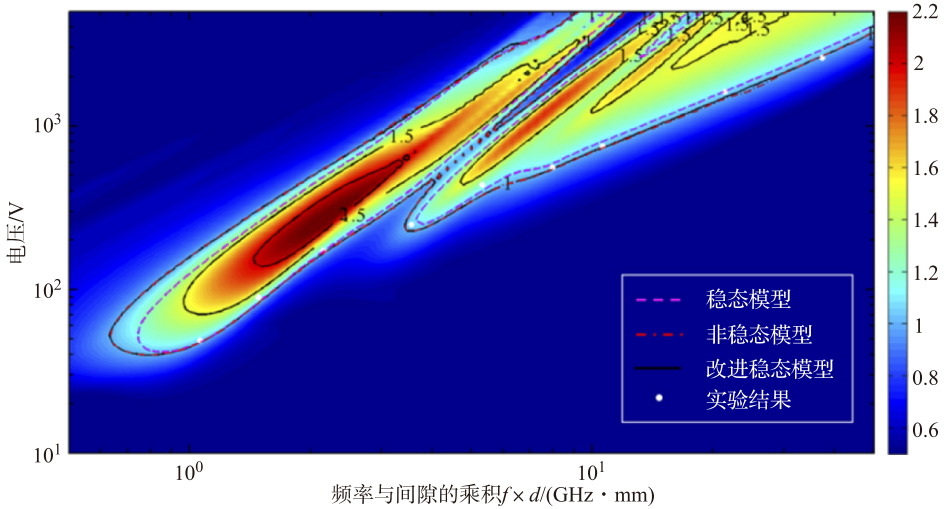


图 3-3 基于改进稳态模型的微放电敏感曲线<sup>[4]</sup>

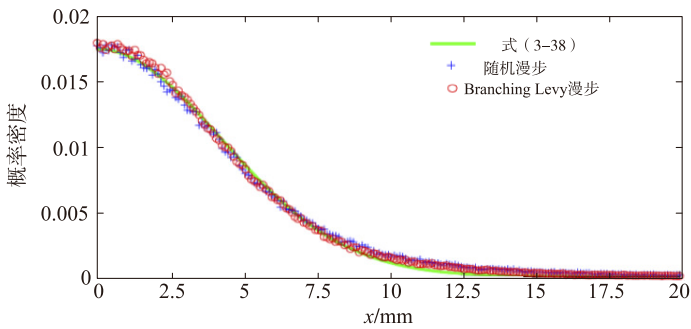


图 3-9 随机漫步和 Branching Levy 漫步的拟合与对比<sup>[7]</sup>

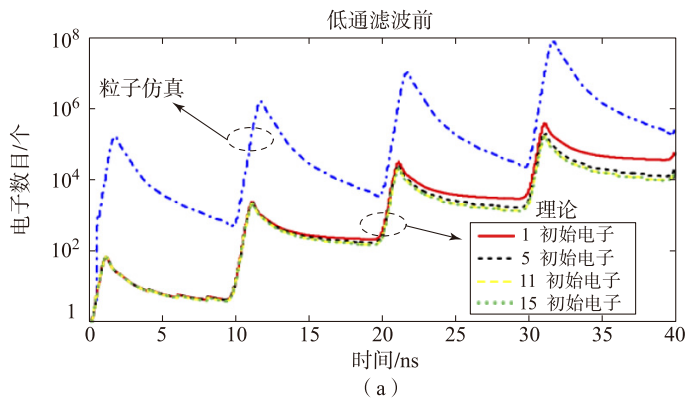


图 3-10 微放电的粒子仿真和理论计算结果<sup>[7]</sup>

(a) 低通滤波前

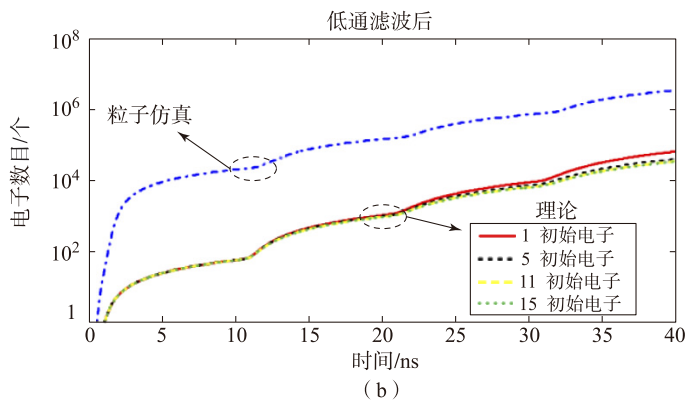


图 3-10 微放电的粒子仿真和理论计算结果<sup>[7]</sup> (续)  
(b) 低通滤波后

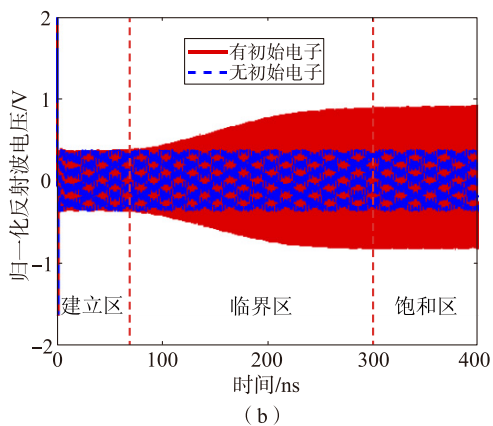
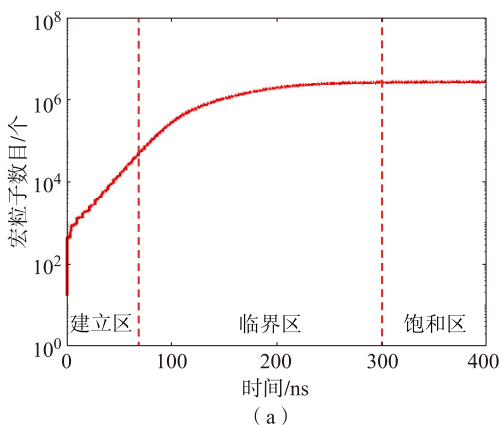


图 4-2 单载波微放电演化过程的粒子模拟<sup>[18]</sup>  
(a) 宏粒子数量; (b) 归一化反射波电压

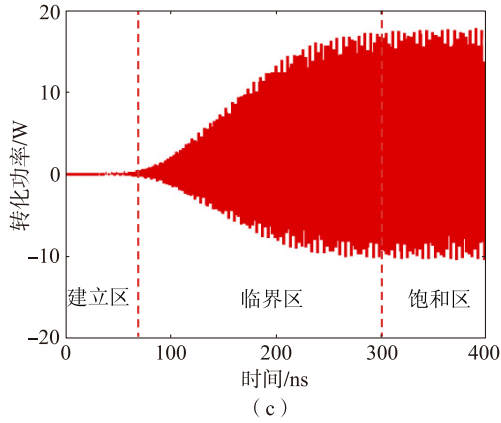


图 4-2 单载波微放电演化过程的粒子模拟<sup>[18]</sup> (续)  
(c) 转化功率

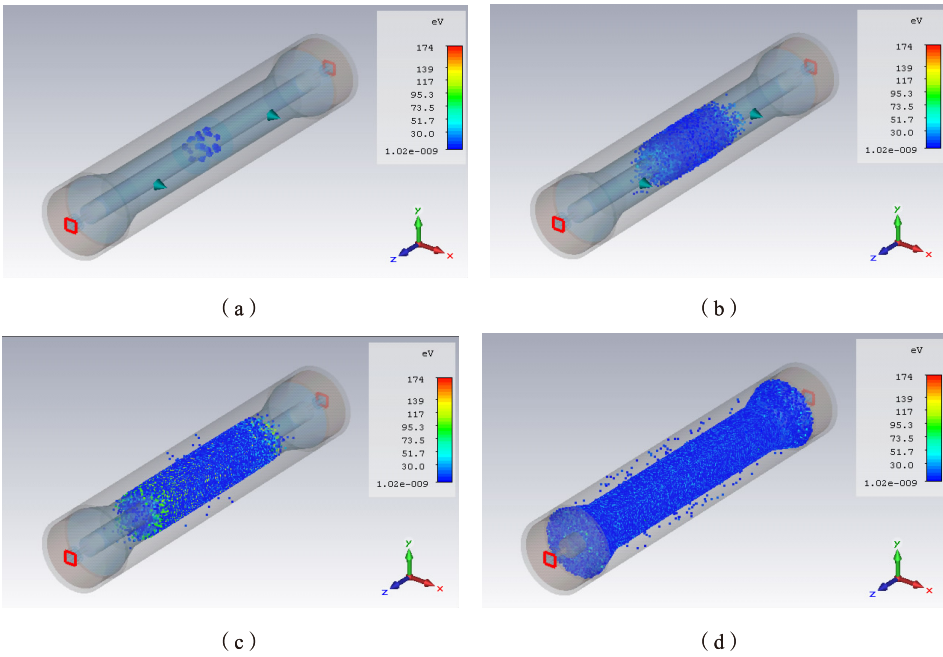


图 4-5 微放电过程中电子的空间分布  
(a) 1 ns; (b) 70 ns; (c) 133 ns; (d) 300 ns