

高功率微波系统中的 击穿物理

常 超 编著



科学出版社

高功率微波系统中的击穿物理

常 超 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者根据在高功率微波(HPM)击穿领域近 10 年的科研工作实践,结合国内外优秀研究成果编写而成,是一部多学科交叉的综合性学术著作。全书共 8 章:第 1 章为绪论;第 2~3 章是关于 HPM 产生及传输器件真空表面击穿的理论与实验;第 4~5 章详细阐述了真空介质面 HPM 倍增击穿的理论、实验及诊断研究;第 6~7 章深入系统地介绍了周期性表面结构和谐振磁场提高输出窗真空击穿阈值的原理和方法;第 8 章是关于输出窗大气侧以及大气传输过程中 HPM 击穿的研究。

本书汇集了 HPM 产生、传输和发射系统击穿领域的相关学术成果和最新发展动态,内容翔实,脉络清晰,概念剖析详略适宜,数学推导层次分明,既可以作为高功率微波研究人员的学习教材,也可以作为科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高功率微波系统中的击穿物理/常超编著. —北京:科学出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-03-045926-8

I. ①高… II. ①常… III. ①大功率—微波技术—击穿—研究
IV. ①TN015 ②046

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 240565 号

责任编辑:赵彦超 裴 威 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 1 月第一次印刷 印张:17 1/2 插页:3

字数:336 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

高功率微波(HPM)在科研、民用和国防领域具有非常广阔的应用前景。HPM具有瞬时高峰值功率达到数吉瓦、脉宽从几十至数百纳秒的特点,HPM系统中强电磁场击穿是限制其功率容量的主要因素,已成为 HPM 技术进步的瓶颈和国际性的技术挑战。

本书详细阐述了 HPM 产生器件、HPM 无源传输和发射器件、输出窗真空侧、输出窗大气侧以及自由空间中强电磁场击穿的物理机制:HPM 产生、传输和发射器件中击穿主要是金属表面的微观场增强点,在 100MV/m 量级的强电场作用下触发场致电子发射,电子诱导气体脱附,在表面气体层中发生等离子体放电;而在脉冲上升和下降沿以及器件内电磁场较弱的区域,二次电子倍增会吸收微波能量并局部沉积大量的热量,由此产生的持续热应力将引起器件的损伤;HPM 输出窗真空侧的击穿主要是由二次电子倍增触发,在介质表面释放气体层中产生等离子体电离雪崩放电;而大气侧的击穿主要是由气体分子的紫外辐射在介质表面诱导光电子发射,以及在表面非线性鞘层的局部增强电场中发生的等离子体放电。

本书深入研究了 HPM 系统各部分不同类型的击穿机理,据此探讨了相应的抑制击穿的物理方法和处理工艺,并重点讨论了采用周期性表面结构和谐振磁场抑制 HPM 输出窗真空侧二次电子倍增的方法。

本书第 2~3 章是关于 HPM 产生、传输器件真空表面击穿的理论及实验;第 4~7 章为真空介质面 HPM 倍增击穿的理论、实验、诊断及抑制方法的系统介绍;第 8 章是大气介质面及自由空间 HPM 击穿的理论及实验。

本书融合了 HPM 产生、传输和发射系统击穿研究领域的显著学术成果和最新发展动态,力求为高功率微波研究人员奉献一部理实兼备的能提供有效参考甚或具有启发作用的系统性专著,亦可作为研究生教材。当然由于作者才识有限,书中不免存有纰漏或不足之处,切望专家学者批评指正。

本书是在导师刘国治院士的多次建议、支持和鼓励下,花费大量时间完成的,在此作者特别感谢老师为人育学的教诲!同时,作者衷心感谢陈昌华研究员、孙钧研究员、黄文华研究员、刘纯亮教授的宝贵支持、帮助和讨论!

感谢同事:刘彦升(参与编写第 2 章、第 3 章)、李爽和焦晓静(提供第 3 章的部分文献资料)、曹亦兵(提供第 2 章的部分文献资料)、范志强(校审全书公式及图表)。

作 者

2015 年 4 月

主要符号对照表

B	外磁场	T	微波周期
B_{rf}	微波磁场分量	u 或 u_e	电子速度
c	光速	δ	二次电子发射产额
dc	直流	ϵ_e	电子动能
E_{rf}	微波电场分量	ϵ_i	离子动能
E_{dc}	表面累积电荷场	ϵ_{p1}	二次产额曲线的第一交叉点
E_B	电场击穿阈值	ϵ_{p2}	二次产额曲线的第二交叉点
m	电子质量	λ	微波波长
M	离子质量	ν_i	电子和气体分子的电离率
n 或 n_e	电子数密度	ν_m	电子和气体分子的动量转移碰撞频率
n_c	等离子体临界数密度	σ_i	电子和气体分子的电离截面
n_g	气体分子密度	σ_m	电子和气体分子的弹性碰撞截面
n_i	离子数密度	τ	电子渡越时间
p	气压	Φ	电势
RF	射频微波	φ	RF 场相位
SEY	二次电子发射产额	Ω	电子回旋频率
T_e	电子温度	ω	微波角频率
T_i	离子温度		

目 录

前言

主要符号对照表

第 1 章 绪论	1
1.1 本书的研究背景和意义	1
1.1.1 高功率微波的定义和应用	1
1.1.2 强电磁场击穿瓶颈问题	2
1.2 本书的结构与范围	3
参考文献	5
第 2 章 HPM 真空击穿基础及产生器件击穿	6
2.1 引论	6
2.2 金属表面电子发射理论基础	6
2.2.1 场致电子发射	6
2.2.2 微波电场致发射	8
2.2.3 场增强机制	9
2.2.4 微波条件下对场致发射有影响的因素	12
2.2.5 发射电流的加热作用	14
2.2.6 二次电子发射	16
2.3 常规射频结构真空强电磁场击穿	17
2.3.1 常规射频结构真空强场击穿概述	17
2.3.2 真空金属强电场击穿实验	18
2.3.3 X 波段谐振环中的 TM_{020} 谐振腔击穿	22
2.3.4 真空强电场击穿数值模拟	24
2.3.5 真空强磁场热疲劳击穿	26
2.3.6 提升击穿阈值的材料和工艺基础	30
2.4 HPM 高频结构真空强电磁场击穿	31
2.4.1 HPM 源与相对论返波管概述	31
2.4.2 HPM 高频结构击穿机理	32

2.4.3	HPM 高频结构击穿诊断	33
2.4.4	HPM 高频结构击穿抑制方法	35
2.4.5	镀层在 HPM 器件的应用	38
2.5	小结	40
	参考文献	40
第 3 章	HPM 无源器件真空强电磁场击穿	43
3.1	引论	43
3.2	HPM 无源器件真空强场击穿机理初步	44
3.2.1	金属表面纳秒 HPM 击穿	44
3.2.2	PIC 模拟金属表面强场击穿动力学	46
3.3	HPM 传输器件真空强场击穿诊断	48
3.3.1	HPM 传输通道内 TE_{11} 模式击穿发光	48
3.3.2	HPM 传输通道内 TM_{01} 模式击穿发光诊断	54
3.3.3	波导与收集极附近的 X 射线诊断	56
3.4	双金属表面间谐振倍增理论	58
3.4.1	双表面倍增的基本理论	60
3.4.2	谐振相位的稳定性	64
3.4.3	倍增过程中的相位变化	65
3.4.4	切向和法向发射速度对倍增的影响	66
3.4.5	双表面倍增中的混合模	69
3.5	空间电荷场与谐振倍增饱和规律	70
3.5.1	双平板结构的倍增饱和	70
3.5.2	二次电子产额对倍增饱和的影响	74
3.5.3	饱和边界曲线	77
3.5.4	倍增放电实验	78
3.6	同轴线和圆波导内的倍增	80
3.6.1	同轴线倍增规律	80
3.6.2	圆波导内不同极化电场下倍增规律	84
3.7	TiN 镀层对真空系统释气率的影响	88
3.8	小结	92
	参考文献	93

第 4 章 真空介质面 HPM 倍增击穿	96
4.1 引论	96
4.2 射频二次电子倍增的前期理论	96
4.2.1 介质面二次电子发射	96
4.2.2 射频二次电子倍增理论	97
4.3 介质窗 HPM 击穿的前期实验	99
4.4 考虑表层气体的电子倍增模型	103
4.4.1 HPM 倍增击穿的主要物理过程	103
4.4.2 动力学模型	104
4.4.3 碰撞电离参数计算	106
4.4.4 模型结果	107
4.5 短脉冲击穿所需的表面气压及来源	109
4.5.1 倍增饱和数密度与微波截止	109
4.5.2 短脉冲击穿需要的表面气压	110
4.5.3 气体脱附的种类和速率	111
4.5.4 介质面毛刺的场增强	112
4.5.5 等离子体焦耳热和介质热损耗	115
4.5.6 倍增热沉积	115
4.6 重复频率脉冲的 HPM 击穿	116
4.6.1 重频脉冲的倍增热累积	116
4.6.2 重频脉冲的电子累积	117
4.6.3 重复频率 HPM 击穿实验和结果	118
4.7 介质材料性能和表面处理	121
4.7.1 介质材料主要性能	121
4.7.2 介质窗表面清洁处理	122
4.8 纳米镀层在 HPM 输出窗中的应用	124
4.8.1 不同厚度和温度下 TiN 镀层对二次电子产额的影响	124
4.8.2 SLAC 对比研究纳米 TiN 和 Cr 镀层输出窗的效果	125
4.8.3 KEK 研究纳米 TiN 镀层对输出窗的倍增抑制和损耗	127
4.9 小结	130
参考文献	131

第 5 章 空间电荷场和等离子体时空诊断	136
5.1 引论	136
5.2 空间电荷屏蔽的倍增模型	136
5.2.1 前期工作回顾	136
5.2.2 正空间电荷势和场	138
5.2.3 负空间电荷势和场	142
5.2.4 讨论	143
5.3 HPM 输出窗真空侧击穿等离子体时空诊断	144
5.3.1 HPM 输出窗真空侧击穿诊断	144
5.3.2 实验结果的机理分析	146
5.4 汤姆孙散射诊断 HPM 输出窗击穿	148
5.4.1 等离子体电子密度与散射光谱的关系	150
5.4.2 等离子体扩散速度与散射光谱之间的关系	150
5.4.3 等离子体温度与散射光谱之间的关系	150
5.4.4 去除背景噪声、降低测量误差	150
5.5 激光诱导荧光光谱诊断等离子体	152
5.5.1 激光诱导荧光诊断原子密度	152
5.5.2 激光诱导荧光坑的 Stark 谱诊断电场	152
5.6 小结	154
参考文献	154
第 6 章 周期性表面提高 HPM 窗真空侧击穿阈值的方法	156
6.1 引论	156
6.2 周期性矩形表面抑制倍增的理论和实验	156
6.2.1 动力学模型	156
6.2.2 PIC 模拟	159
6.2.3 大功率实验研究	161
6.3 周期性三角形表面抑制倍增和等离子体的理论	165
6.3.1 动力学计算	165
6.3.2 三角形表面的场分布	167
6.3.3 考虑场分布后的倍增和等离子体动力学	169
6.3.4 PIC 模拟 S 波段倍增的抑制	174

6.3.5 PIC 模拟 X 波段倍增和等离子体的抑制	177
6.4 周期性三角形表面提高 HPM 击穿阈值的实验	179
6.4.1 大功率实验研究	179
6.4.2 HPM 实验验证	181
6.4.3 氟化周期性表面提高击穿阈值	184
6.4.4 讨论	188
6.5 三维周期性表面抑制任意极化电磁场的倍增	189
6.5.1 三维周期性函数结构内场分布	190
6.5.2 三维周期性函数结构内电子运动	192
6.5.3 三维周期表面抑制倍增的实验	194
6.6 小结	196
参考文献	196
第 7 章 谐振磁场抑制真空介质面 HPM 倍增的方法	199
7.1 引论	199
7.2 早期工作回顾	199
7.2.1 微波磁场对 HPM 倍增的影响	199
7.2.2 外磁场对 HPM 倍增的影响	200
7.3 谐振磁场抑制 HPM 输出窗真空倍增的机理	202
7.3.1 动力学模型	202
7.3.2 二维 PIC 模拟	205
7.3.3 三维 PIC 模拟	208
7.4 功率容量提高的原理性实验验证	209
7.4.1 长脉冲下实验验证	209
7.4.2 短脉冲下实验验证	211
7.4.3 采用海尔贝克磁铁的实验验证	213
7.5 谐振磁场提高介质加载加速器结构击穿阈值的方法	216
7.5.1 介质加载加速器结构的单表面谐振倍增	216
7.5.2 介质单表面谐振倍增机理	217
7.5.3 TiN 镀层对单表面谐振倍增的有限抑制	218
7.5.4 磁场抑制单表面谐振倍增的动力学模型	220
7.5.5 磁场抑制单表面谐振倍增的 PIC 模拟	224

7.5.6 磁场提高击穿阈值的实验验证	228
7.6 小结	230
参考文献	231
第8章 不同气压下气体与介质面 HPM 击穿	233
8.1 早期工作回顾	233
8.1.1 HPM 大气击穿的理论模型	233
8.1.2 单极性条件下介质/气体界面击穿	237
8.1.3 介质/气体界面 HPM 击穿实验	239
8.1.4 介质/气体界面 HPM 击穿模拟	242
8.1.5 介质/气体界面 HPM 击穿的抑制	245
8.2 低气压下介质/气体 HPM 击穿的全局模型	247
8.2.1 全局模型	248
8.2.2 电离碰撞参数和模型结果	250
8.2.3 讨论	251
8.3 HPM 输出窗大气侧击穿等离子体诊断与分析	252
8.3.1 介质/大气界面等离子体时空演化诊断	252
8.3.2 电磁场建模	253
8.3.3 电磁 PIC 模拟与等离子体动力学	255
8.3.4 流体动力学模型	257
8.4 HPM 输出窗不同气压下击穿等离子体诊断	258
8.5 小结	262
参考文献	263

第 1 章 绪 论

1.1 本书的研究背景和意义

1.1.1 高功率微波的定义和应用

高功率微波(high power microwave, HPM)是指峰值功率超过 100MW, 频率 1~300GHz 的电磁辐射^[1]。HPM 在科研、民用和国防领域具有非常广阔的应用前景。主要应用包括^[1-3]: ①通过电子回旋共振机制对受控热核等离子体加热; ②用于高功率短脉冲雷达, 实现较宽频带下精确分辨被探测和跟踪的目标; ③为地球和太空之间传输能量; 为宇宙飞船发射到太空轨道或者轨道之间变换提供能量; ④用于高能粒子射频加速器, 进行高能物理、核物理科学研究; ⑤用于 HPM 定向能武器。将 HPM 通过定向天线辐射, 用高功率、高方向性的窄微波束瞬时照射目标, 击穿或烧毁敌方现代化武器系统的关键电子设备, 可有效攻击雷达、通信设备、计算机、飞机和导弹等, HPM 武器已成为未来高新技术战场上可选择的杀手锏武器。

俄罗斯 GW 级 HPM 微波源系统的装置照片及诊断波形如图 1.1 所示。典型的 GW 级 HPM 系统主要由脉冲功率驱动源子系统和 HPM 微波源子系统构成。HPM 微波源子系统由磁绝缘无箔二极管(包括磁体线圈、阴极、电子束收集极等)、高频结构(包括用于产生和提取高功率微波的各种谐振腔、慢波结构等)和微波传输及发射分子系统(包括模式转换器、馈源喇叭、介质窗等)组成, 如图 1.2 所示。HPM 源系

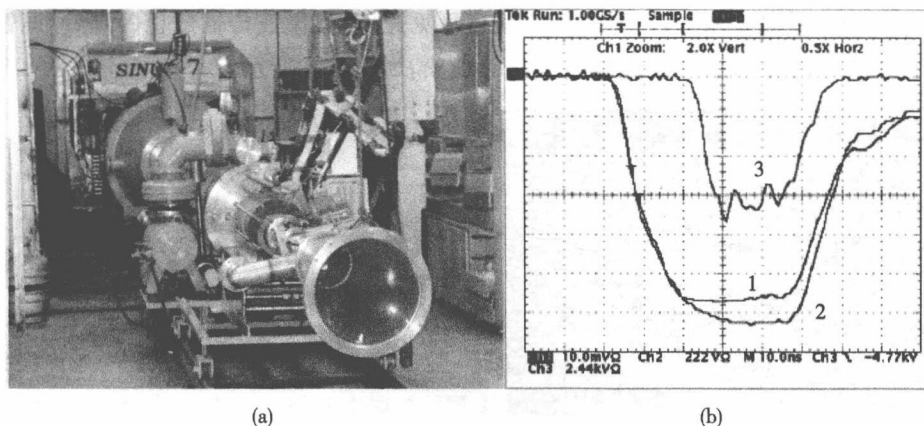


图 1.1 (a)俄罗斯 Sinus-7 谐振 BWO 系统和(b)典型波形^[4]

1 和 2 为二极管的电流和电压波形; 3 为微波辐射波形

统在真空状态才能有效工作,由脉冲功率驱动源驱动阴极产生强流相对论电子束,电子束在磁体线圈产生的强磁场约束下与高频结构相互作用产生高功率微波,通过喇叭或馈源将微波辐射向大气。

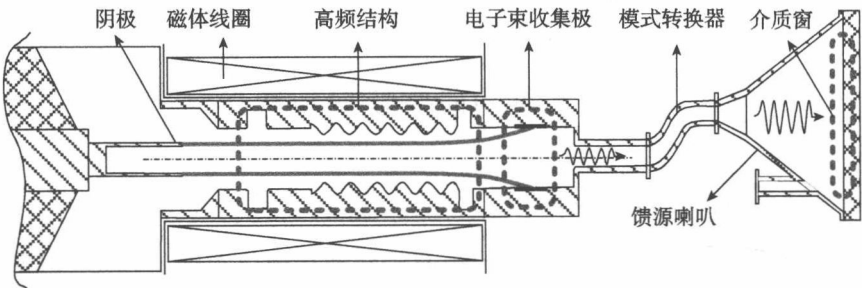


图 1.2 一种典型高功率微波源结构示意图

1.1.2 强电磁场击穿瓶颈问题

HPM 源一般工作中在低真空状态(约 10^{-2} Pa 水平),输出功率约数 GW,电磁场功率流密度高达数百 MW/cm^2 。在 HPM 产生及传输过程中,HPM 源的局部会承受极强的电磁场和功率流;由于高功率密度强电磁场、强流相对论电子束、强引导磁场的存在,当局部场强超过金属表面发射阈值,会引起强场致发射产生种子电子;种子电子与强电磁场相互作用获取能量,并在强磁场约束下以较高功率流密度轰击金属表面;当沉积在金属中的能量达到临界值时,就会引起金属材料烧蚀气化、高频结构破坏(如图 1.3 所示)。

介质输出窗起着隔离真空和大气、辐射微波的作用,输出窗的 HPM 击穿发生在真空侧及大气侧,通常在输出窗的大气侧施加 SF_6 气袋以避免大气侧击穿。输出窗的真空侧在强电磁场作用下发生二次电子倍增并诱导表面气体释放,在表层气体中发生等离子体电离雪崩^[6],击穿时产生强烈可见光发射、微波传输截止(即脉冲尾蚀)及重复频率下输出窗表层材料破裂碳化等现象,如图 1.4 所示。

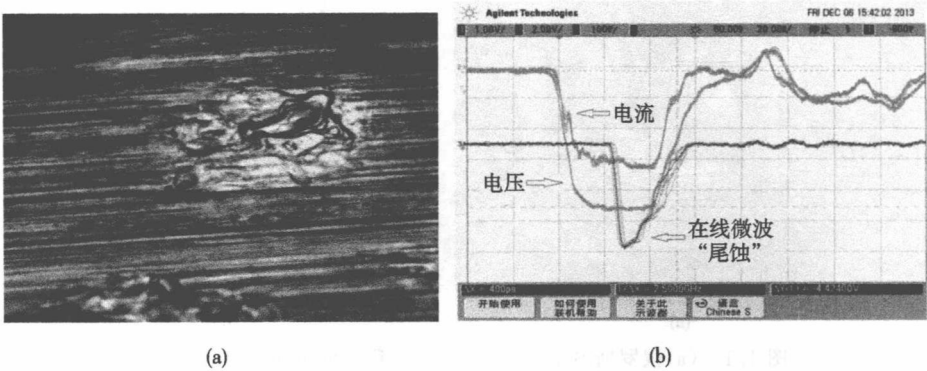


图 1.3 强电磁场击穿引起(a)相对论返波管局部结构破坏和(b)微波尾蚀波形^[5]

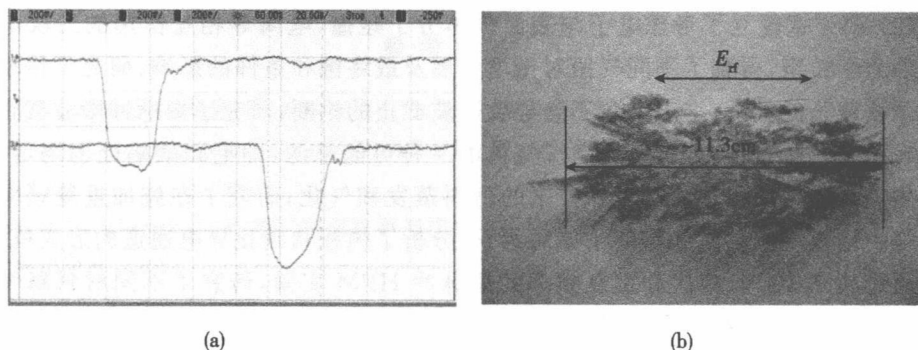


图 1.4 (a)介质窗击穿微波波形(上为入射脉冲,下为辐射脉冲);(b)真空侧表层击穿痕迹

随着高功率微波技术向着高峰值功率($>5\text{GW}$)、长脉冲($>100\text{ns}$)和高重复频率($>100\text{Hz}$)发展,强电磁场击穿已成为限制 HPM 系统功率容量的主要因素,是 HPM 技术进步的瓶颈和国际性技术挑战之一^[3]。提高 HPM 击穿阈值的途径和方法已成为 HPM 系统必须发展的关键技术^[3]。

1.2 本书的结构与范围

本书是关于高功率微波强电磁场击穿物理的专著,章节的布局是按照 HPM 真空击穿基础、HPM 产生器件、HPM 无源传输和发射器件、输出窗真空侧、输出窗大气侧及自由空间的顺序依次展开。每章的开始都从历史角度来描述所涉及的研究内容和相关机理,重点讨论了当今最高研究水平,且每章首尾均有引论和小结。

(1) 第 2 章首先讨论了金属表面电子发射的几种基本机制,包括直流和微波条件下的场致电子发射、场增强、发射电流加热、二次电子发射等。之后比较了常规射频结构真空强电磁场击穿机理,讨论了 HPM 产生器件在强引导磁场、强流电子束作用下的强场击穿机理、诊断技术及抑制方法等。

(2) 第 3 章研究了 HPM 无源传输和发射真空器件金属表面强电磁场区域的纳秒击穿机理。讨论了“脏”表面吸附气体和杂质、电子诱导气体脱附、空间电荷场加速阳离子、离子溅射、离子所致的二次电子等与击穿相关的因素。通过纳秒级响应的四分幅 ICCD 相机和光电倍增管对比研究了不同功率容量下波导击穿等离子体的可见光和 X 射线强度随时空变化的规律。

在脉冲上升和下降沿以及器件内电磁场较弱的区域,二次电子倍增产生的电子云会增加系统噪声和损耗,产生不希望出现的谐波,同时局部热沉积导致该区域过热,进而引起器件的损伤。因此本章研究了双平板间谐振倍增机理,分析了射频磁场、倍增相位的稳定性、切向和法向速度分量等因素。总结了谐振倍增饱和的三种机制:碰撞能量限制、返回限制、倍增电流对谐振结构的加载效应。

(3) 第4章建立了考虑电子与表面气体分子碰撞、电离等相互作用的二次电子倍增动力学模型,得到了不同气压对倍增发展及最终饱和条件的影响;研究了倍增饱和与微波截止的关系,得出饱和不会导致微波截止的论断;研究了短脉冲微波截止所需的表面高压条件,分析了该高压气体的一种可能来源,即毛刺缺陷处的场增强、微波热损耗和倍增导致的热沉积带来的材料蒸发和气化;研究了在施加重复频率脉冲过程中倍增沉积热量和等离子体的累积,分析了树枝状碳化导电通道的形成机理。继之通过功率1GW、单次和重复频率的短脉冲HPM实验,研究了不同材料释气量和击穿的关系;最后探讨了纳米TiN镀层减小二次电子产额的效果,以及在HPM输出窗的应用。

(4) 第5章研究了等离子体和倍增电子共同形成的正空间电荷场对二次电子倍增饱和的影响。通过纳秒高速四分幅ICCD相机并结合微波在线与辐射场波形等多种诊断手段,研究了HPM窗口真空侧纳秒击穿等离子体随时间和空间演化的规律和特征结构。通过PIC仿真研究了电子倍增、等离子体和空间电荷场在主脉冲及尾脉冲内发展的机理,解释了实验现象。

(5) 第6章探讨了周期性表面结构抑制二次电子倍增、提高HPM击穿阈值的方法。通过动力学计算和二维电磁PIC模拟,分别分析了周期性矩形和三角形表面抑制倍增和低气压等离子体的机理以及影响抑制效果的主要物理因素,并通过原理性实验研究了周期性表面结构提高击穿阈值的规律;在介质窗周期性表面的加工过程中采用特定低温加工工艺,避免了杂质和缺陷的产生,经过GW级HPM击穿实验,验证了低温加工的周期三角形表面能够显著提高功率容量;最后提出了三维周期性表面抑制任意极化或圆极化电场下的二次电子倍增、提高HPM击穿阈值的方法。

(6) 第7章探讨了谐振磁场抑制真空介质面倍增和提高HPM击穿阈值的方法,该谐振磁场是回旋频率 Ω 接近微波角频率 ω 、方向平行于介质面且垂直于微波电场的外加直流磁场。通过动力学计算和电磁PIC模拟,研究了谐振磁场抑制倍增的机理,分析了磁感应强度、微波频率和场强等对倍增抑制的影响;采用海尔贝克磁铁,实现了大口面各向同性、均匀幅度的磁场,通过GW级实验研究了谐振磁场提高击穿阈值的规律。最后介绍了满足特定幅度和方向的磁场抑制介质加载加速器结构中单介质表面谐振倍增物理机制。

(7) 第8章探讨了HPM在自由空间传播以及介质/气体界面的HPM击穿阈值及时延规律。通过全局模型研究了低气压下HPM介质面等离子体击穿规律,模型中考虑了等离子体和介质表面的相互作用,包括等离子体向介质壁的扩散以及二次电子的返回补偿等;通过纳秒高速四分幅ICCD相机诊断研究了介质窗大气侧击穿等离子体的时空演化过程,并通过PIC模拟和解析计算分析了介质表面空间电荷鞘层特征及其非线性发展规律。

参 考 文 献

- [1] 周传明,刘国治,刘永贵,等. 高功率微波源. 北京:原子能出版社,2007.
- [2] Benford J,Swegle J,Schamiloglu E. 高功率微波. 第2版. 江伟华,张弛译. 北京:国防工业出版社,2009.
- [3] Barker R,Schamiloglu E. 高功率微波源与技术.《高功率微波源与技术》翻译组译. 北京:清华大学出版社,2005.
- [4] Korovin S,Kurkan I,Loginov S,et al. Decimeter-band frequency-tunable sources of high-power microwave pulses. *Laser Part. Beams*,2003,21:175—185.
- [5] 张余川. 提高相对论返波管输出脉冲能量研究. 硕士学位论文. 西安:西北核技术研究所,2014.
- [6] 常超. HPM 馈源介质窗击穿机理研究及其应用. 博士学位论文. 北京:清华大学,2011.

第2章 HPM 真空击穿基础及产生器件击穿

2.1 引 论

真空强电磁场击穿是在真空环境下由于微波强电磁场的存在而引起的材料表面等离子体放电现象。这一现象涵盖了种子电子产生、电子与强电磁场作用获取能量、电子与材料作用产生等离子体以及等离子体与微波相互作用的全过程。真空强电磁场击穿会产生大量等离子体,影响装置的工作稳定性和可靠性。

金属真空强电磁场击穿过程包括:金属表面微观结构(微凸起、杂质等)的局部增强电场诱发强场致电子发射(field emission, FE)或爆炸电子发射(explosive emission),形成暗电流;表面微观缺陷会被暗电流带来的欧姆损耗加热、熔化、并形成金属材料蒸汽,在表面气体层中发生等离子体电离雪崩,高密度等离子体引起微波传输截止;在空间电荷场作用下,离子被加速获得高能,轰击金属表面形成“陨石坑”,对表面结构产生不可逆转的损伤。场致电子发射和表面气体是产生真空强电磁场击穿最主要的诱因。而在幅度为 100MV/m 量级的强电磁场作用下,电子能量可达 MeV ,远高于二次产额曲线的第二交叉点,二次电子产额远小于 1,因此二次电子倍增主要发生在微波脉冲的上升沿和下降沿、以及电磁场较弱、强导引磁场区域。

本章首先讨论了金属表面电子发射的几种基本机制,包括直流和微波条件下的场致电子发射、场增强、发射电流加热、二次电子发射等;随之比较了常规射频结构真空强电磁场击穿机理,讨论了 HPM 产生器件强场击穿的机理、诊断及抑制方法等。

2.2 金属表面电子发射理论基础

2.2.1 场致电子发射

无外加电场时,电子被势垒束缚在金属内部,势能满足 $-W_e = e^2 / (16\pi E_z)^{[1-3]}$, z 为真空区与金属表面间的距离。在真空中,当金属表面微观电场强度达到 1GV/m 或更高时,表面势垒高度降低、宽度变窄,即外加电场的能量表示为 $-W_f = eE_z$,总能量为 $W_t = W_f + W_e$ 。通过考察电子的波函数可以发现,即使电子能量不足以克服势垒,由于量子隧穿效应,仍有一定概率穿透势垒成为自由电子,引起场致电子发射,如图 2.1 所示。