2018 年度陈嘉庚科学奖专辑

陈嘉庚青年科学奖——信息技术科学奖获奖人

常超

西安交通大学教授, 国家科技创新特区太赫兹生物学主题首席科学家、太赫兹主题专家. 获 2017 IEEE NPSS Early Achievement Award, 获部级科技进步一等奖. 国家优秀青年科学基金获得者. IEEE 国际会议 APCOPTS 大会主席, 第 18 届全国等离子体大会组委会主席. *IEEE Trans Plasma Sci* 客座编辑.

相关成果名称: 周期性表面和谐振磁场抑制电子倍增、提高 HPM 窗击穿阈值的方法和技术

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 源须工作在真空状态, 输出窗用于隔离内部真空和外界大气并辐射微波. HPM 产生几十亿瓦峰值功率的微波传输至输出窗时, 微波强场在窗真空侧触发电子倍增和等离子体雪崩, 微波被吸收和反射、传输终止, 窗材料击穿破坏. HPM 输出窗击穿限制了 HPM 系统的最大辐射功率, 已成为 HPM 技术进步的瓶颈和国际性挑战.

常超在国际上建立了 HPM 输出窗二次电子倍增、气体脱附层中等离子体雪崩理论模型, 提出了周期性表面和谐振磁场两种抑制电子倍增、提高 HPM 窗击穿阈值的新原理和新方法. 两种方法均通过改变电子轨迹、飞行时间和碰撞能量, 周期性表面是降低电子能量到二次产额曲线第一交叉点、飞行时间远小于微波周期, 谐振磁场是提高电子能量到二次产额曲线第二交叉点、飞行时间接近一个微波周期, 均实现倍增的显著抑制. 发明的超高功率容量窗, 在吉瓦功率 HPM 实验中, 证实可显著提高功率容量, 突破了 HPM 系统功率容量瓶颈.

高功率微波等离子体放电研究进展

常超^{1,2}

1. 国防科技创新研究院前沿交叉中心, 北京 100071;
2. 西安交通大学物理电子与器件教育部重点实验室, 西安 710049
E-mail: changc@xjtu.edu.cn

2018-03-23 收稿, 2018-04-24 修回, 2018-04-25 接受, 2018-05-18 网络版发表
国家自然科学基金(11622542 和 51677145)资助

摘要 高功率微波(HPM)在科研、民用和国防领域具有广阔的应用前景。HPM具有瞬时高峰值功率达到数十亿瓦、脉宽从几十至数百纳秒的特点, 随着HPM技术向高峰值功率、长脉冲和高重复频率发展, 强电磁场击穿已成为限制HPM产生、传输及辐射系统功率容量的主要因素, 是HPM技术进步面临的巨大技术挑战之一。本文综述了近20年来HPM输出窗真空及大气击穿、金属表面击穿等方面的国内外主要研究进展: 击穿机理方面, 国内外已对基本物理过程进行了定性描述, 基本建立了二次电子倍增、表面气体释放及等离子体雪崩的动理学模型, 但缺乏定量描述、实验数据支撑和等离子体能谱与密度的时空诊断。周期性表面、谐振磁场、表面氟化等物理和化学新方法已经成功运用到抑制击穿、提高功率容量的技术中, 但离实用化还有差距。

关键词 高功率微波, 强电磁场击穿, 等离子体, 输出窗放电, 大气放电, 金属放电

高功率微波(High Power Microwave, HPM)是指峰值功率超过100 MW, 频率300 MHz~300 GHz的电磁辐射^[1]。HPM技术是20世纪70年代以来随着脉冲功率技术和微波管技术的发展而产生的一门交叉学科, 是脉冲功率技术、等离子体物理学及电真空技术相结合的产物, 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。

高功率微波主要应用包括^[2~5]: (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。

典型的HPM系统主要由脉冲功率驱动源子系统、HPM微波源子系统和HPM传输及发射子系统构成。HPM源系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。

HPM已发展到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, 随着HPM技术向高峰值功率、长脉冲和高重复频率发展, 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技术进步面临的巨大技术挑战之一。探究强电磁场击穿机理, 提出有效抑制击穿的方法是应对挑

引用格式: 常超. 高功率微波等离子体放电研究进展. 科学通报, 2018, 63: 1391–1403

Chang C. High power microwave plasma discharge (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1391–1403, doi: 10.1360/N972018-00272

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972018-00272>

战的必由之路^[1].

1 介质窗真空侧HPM击穿理论及实验研究

1.1 介质窗真空击穿机理研究

介质窗真空侧HPM击穿是一系列复杂物理规律发展到最后的结果,它由二次电子倍增触发,通过最终微波传输的突然截止来表征^[1].

在介质窗二次电子倍增和击穿理论研究方面,国际上主要有密歇根大学、德克萨斯理工大学、加利福尼亚大学伯克利分校等;国内主要有清华大学、西北核技术研究所、国防科技大学、西安交通大学、北京应用物理与计算数学研究所、中国科学院电子学研究所、西安电子科技大学、湘潭大学等科研单位.主要研究切向rf电场作用下的介质面二次电子倍增和等离子体放电的机理,包括:倍增饱和及功率沉积,空间电荷场屏蔽,击穿时延,微波磁场和外磁场的作用等.

Lau研究组^[6-8]于1998年建立了切向射频电场作用下理想真空介质面二次电子倍增发展及饱和模型,并解释了二次电子倍增饱和机制.即随着倍增的发展,电子数增多,而表面正电荷也会快速积累,表面累积电荷场 E_{dc} 增强,电子渡越时间 τ 变短,电子从rf场中获得的能量 ε_e 变小;当倍增饱和时,表面累积电荷场很强,使得 $\tau \ll T$, ε_e 接近二次发射曲线的第一交叉点 ε_{p1} ,平均二次电子产额保持在1,倍增进入电子数达到最大并且平均数保持基本不变的稳定状态,得到了不同材料的倍增饱和和边界曲线,即敏感性曲线.然而,有关模型是在理想真空背景的假设下进行,而实际情况下,由于常常采用高分子聚合物作为介质窗材料,表面的二次电子倍增必然导致材料释气,事实上,表面气压只在倍增的初始阶段较低.随着倍增发展,倍增电子不断地诱导表面气体脱附,如图1所示,兼以倍增电子热沉积导致表层材料蒸发和汽化,导致局部气压不断升高.并会伴随等离子体雪崩过程,因此与实验结果不符合.

Verboncoeur研究组^[9,10]采用通过质点网格法(PIC)和蒙特卡罗碰撞(MC)模拟方法,模拟得出在真空背景下倍增饱和时,表面静电场和电子数密度以2倍于rf频率震荡,倍增敏感性曲线符合李萨如曲线的结论,国防科技大学等也进一步证实了这样的规律^[11].

击穿种子电子主要由HPM系统运行过程中,微

图1 电子在表面平行rf场和法向正电场作用下带有碰撞和电离的倍增示意图

Figure 1 Electron multipactor with collision and ionization under tangential rf field and normal positive accumulated field

波源收集极处强流相对论电子束与金属壁相互作用发生强韧致辐射,可产生大量高能X射线和紫外线,基于光电发射原理在窗表面产生种子电子.宇宙射线等天然环境辐射中也存在紫外线.因此,HPM系统运行辐射等原因不可避免地产生了种子电子.一旦种子电子产生,它将在HPM强电磁场作用下加速运动,并碰撞介质表面产生二次电子,二次发射产额依赖于材料性能、入射电子能量和入射角度^[12],倍增过程伴随电子诱导表面气体释放,在表面气体层中倍增触发等离子体电离雪崩^[13,14].等离子体和倍增电子共同建立空间电荷场^[15,16],该场在一定程度上屏蔽表面累积正电荷场,提高了倍增电子的饱和数密度;等离子体向介质表面扩散,并碰撞产生二次电子,部分二次电子在空间电荷场下返回补偿主等离子体^[17];在击穿时延之后,等离子体达到临界数密度,微波传输截止.在重复频率HPM脉冲的作用下,倍增电子导致的热量累积足以使近表层材料碳化形成树枝化通道,而等离子体的累积会促使击穿时延变短^[18].

蔡立兵等人^[19,23]和董烨等人^[24,25]通过PIC-MCC研究了不同表面气体脱附速率下等离子体和倍增发展规律.得出具有一定宽度的HPM脉冲,当介质表面气体脱附速度大于一定值时,击穿才会发生,且击穿时延在一定范围内随着脱附速率增加而缩短.并研究了不同气压下,等离子体和二次电子倍增各自占主导作用的气压范围和规律.得出在低气压下,当电离频率远小于倍增频率时,倍增起主导作用;而在高压下,电子中性气体碰撞和电离变成主要的.

董烨等人^[26,27]通过PIC数值模拟,发现中低气压下,电子能量接近Maxwell分布,电子能量分布函数对电离参数影响较小;中高气压下,电子能量分布函

数对电离参数有重要影响。

张冠军研究组^[28-31]在结合介质窗真空击穿实验中观测到的“介质窗口表面导电树枝层以及窗口内层毫米量级导电树枝状通道”，认为介质窗口表面的导电树枝层主要由于电场加速下的二次电子轰击材料表面产生，而窗口内层导电树枝通道则是由于表面能量沉积引起的。

我们认为对于长脉冲和高重复频率HPM，倍增的热累积效应非常明显。倍增电子将能量沉积在介质表面微米薄层中^[18]，导致近表层内显著升温，表层材料蒸发，热塑性高聚物在软化温度的击穿性能急剧降低，HPM强电场作用下表层材料发生体积击穿，形成电树枝化的击穿通道。

1.2 介质窗真空击穿诊断和阈值研究

Neuber等人^[32,33]通过介质窗击穿实验发现：一旦击穿通道形成，高能X射线快速停止，而可见光和紫外线的光强增加，其后在上下波导壁之间形成多

个击穿火花通道。X射线停止表明表面气压上升，电子平均能量降低，高能电子消失。击穿之前就诊断到C、H谱，强烈支持击穿在表面释放的气体层中发生。他们得出击穿是由二次电子倍增触发，在表面诱导释放气体层中的等离子体雪崩。

Saito等人^[34,35]在类似的击穿实验中，观察到长度在厘米量级的表面熔化和穿孔。他们认为倍增电子碰撞或者微波窗表面缺陷位置、表面杂质的局部射频损耗增强了局部加热，导致表面熔化、材料汽化、表面气压升高。在汽化后的介质材料“云”上，等离子体放电导致微波传输截止。而击穿的热沉积导致材料破裂和穿孔。

我们通过纳秒高速四分幅ICCD相机诊断了HPM窗口真空侧纳秒击穿的等离子体演化过程。实验发现，在微波脉冲到达窗口之前，没有可见光被探测到，5 ns之后，光发射集中在介质表面2 mm薄层内，如图2(a)；在微波脉冲平顶和尾端，发光亮度提高、厚度增加，如图2(b)；发光层厚度增加到5 mm，并在HPM

图2 HPM窗口真空侧击穿发光的发展和演化过程：频率 9.9 GHz，功率 1 GW，脉宽 15 ns pulse. (a) t_0 ; (b) t_0+15 ns; (c) t_0+30 ns; (d) t_0+60 ns. 四分幅ICCD相机的快门宽度 2 ns 和 5 ns^[36]

Figure 2 Development and evolution of the HPM window breakdown at the dielectric/vacuum interface for a 9.9 GHz, 1 GW, and 15 ns pulse. (a) t_0 ; (b) t_0+15 ns; (c) t_0+30 ns; (d) t_0+60 ns. The four-frame ICCD has shutter width 2 ns and 5 ns, images of visible light are in pseudo color, and $t_0=5$ ns^[36]

脉冲后变得更亮,如图2(c);其后,光强快速衰减、整个区域完全变黑,如图2(d).

在主微波脉冲结束之后,等离子体发光亮度会在短时间内变亮,这是因为在空间电荷场以及可能存在的微波尾脉冲作用下,等离子体会在短时间内继续电离、其数密度 n_e 继续升高,如图3所示.同时,电子能量 ε_e 从几百电子伏特降低到十几电子伏特后,能量更加接近于电子-气体分子激励截面的峰值.因此,一方面 n_e 提高,一方面 ε_e 更靠近发光截面峰值,导致发光变明亮.

通过光学诊断可以得出,纳秒HPM脉冲下真空/介质界面击穿的发光层厚度、对应脱附气体层的厚度在几个毫米量级,等离子体和倍增电子在此薄层内共同发展,等离子体电离对二次电子倍增有促进作用.

2 抑制二次电子倍增的物理方法

2.1 周期性表面抑制二次电子倍增的方法

为了抑制二次电子倍增,Saito等人^[34]在高纯陶瓷窗上磁控溅射0.5~1.5 nm厚的TiN镀层,它具有低二次电子发射系数、弱导电性,便于抑制倍增和减弱表面电荷积累,提高陶瓷窗的击穿阈值.然而,TiN镀层随着时间增长,其效果会大大降低,例如容易发生氧化形成TiN_xO_y,二次产额显著增高;再者,介质表面一旦发生击穿,纳米镀层很容易蒸发和脱落,剩下裸露的介质面成为下次击穿的薄弱点.

图3 PIC仿真等离子体随时间演化规律.法向rf电场(粉色曲线),等离子体-电子密度 n_e (红色),倍增电子数密度 n_{me} (黑色),平均等离子体能量 ε_e (蓝色);峰值 $E_r=40$ kV/cm和峰值 $\varepsilon_e=400$ eV^[36]

Figure 3 Temporal evolution of the normalized rf. E-field profile (pink curve), plasma-electron density n_e (red), multipactor electron density n_{me} (black), and the normalized averaged plasma electron energy ε_e (blue); peak $E_r=40$ kV/cm and peak $\varepsilon_e=400$ eV^[36]

作者团队提出并系统研究了周期性表面结构包括周期性矩形和三角形表面抑制真空介质面二次电子倍增的方法^[38-42].通过动力学计算和PIC模拟研究了抑制倍增的机制.抑制原理主要是通过周期性表面改变电子轨迹、碰撞能量 ε_e 和渡越时间 τ ,使得电子的能量 ε_e 使其小于二次产额曲线的第一交叉点 ε_{p1} 、同时减小电子沿面 τ 使其远小于微波半周期 $T/2$,实现二次产额小于1和稳定、快速地抑制倍增.更具体地说:对于周期矩形表面,电子沿电场力 F_{rf} 运动,其渡越时间 $\tau_1 < T/2$,电子碰撞侧壁后由于 F_{rf} 未反向,因此对新产生的二次电子提供强回复力,二次电子迅速被 F_{rf} 拉回侧壁获得 $\varepsilon_e < \varepsilon_{p1}$, $\delta < 1$,同时其渡越时间 $\tau < T/2$,二次电子在 F_{rf} 反向前向的时间段 $T/2 - \tau_1$ 内多次碰撞侧壁,因此倍增被抑制.

通过S波段、微秒脉宽的大功率实验,一定参数的周期性表面结构能够有效提高功率容量达9倍以上^[39],对应提高击穿阈值在3倍以上,表面周期刻槽的聚四氟乙烯介质窗的击穿阈值可以达到42 kV/cm以上.实验发现击穿阈值的提高与倾角和周期尺寸有关.

作为提高击穿阈值的物理方法,周期性表面结构适合于不同种类的介质材料.然而,周期性表面的抗击穿效果与材料纯度、表面状态、加工工艺密不可分.采用自制高纯度交联聚苯乙烯材料,通过精密加工去除周期性表面根部的毛刺,并通过氟化技术在周期性表面形成微米量级的氟化层,使得聚合物表面的碳-氢键被键能更高的碳-氟键替换,从而增强了材料的耐电子轰击能力,显著提高了抗击穿的效果和稳定性.倾角 $\xi=60^\circ$ 、周期尺寸 $P=1.5$ mm的周期性三角形表面的局部照片如图4(a)所示.通过C波段HPM实验,验证了周期性表面结构能够在吉瓦级提高功率容量达到4倍、有效提高击穿阈值从30 kV/cm到70 kV/cm^[43].周期性表面结构作为提高击穿阈值的物理方法,同样适用于耐高温无机窗材料,例如石英和氧化铝陶瓷,带有周期 $P=1$ mm的陶瓷三角形表面的照片如图4(b).

周期性表面结构抑制二次电子倍增的方法得到国内多家科研单位学者的验证.董烨等人^[44]等通过PIC仿真,研究了不同槽高和槽深对二次电子倍增的抑制规律,得出增加槽深、缩短槽宽可以抑制二次电子倍增,与我们的认识一致.

程国新等人^[45-47]证实周期性表面可通过有效改

图4 带有周期性三角形表面的交联聚苯乙烯窗局部照片(a)和陶瓷窗(b)^[32]

Figure 4 CLPS window with periodic triangular surface (a) and ceramic window (b)^[32]

变击穿通道,显著提高击穿阈值,且不影响微波辐射场分布.Zhang等人^[48]证实周期性槽表面可有效提高大功率输出窗的功率容量.

周期性矩形、三角形等二维表面有相互平行的棱脊和槽底,为了有效抑制倍增,棱脊需要垂直于电场极化方向.换句话说,电场沿槽分量可以增强倍增,当表面刻槽平行于电场时,窗的功率容量甚至低于平面窗的情况.因此,周期性三角形表面形貌决定于微波模式分布.不同模式的电磁场分布不同,周期性表面的结构分布差别显著.为克服电场极化方向和微波模式对周期性表面结构的限制,可通过三维周期性函数表面结构,如同波浪起伏的海面,其每个单元都是转动对称的^[49].如图5所示:周期尺寸通常小于微波波长的三十分之一,即周期结构单元深度为 f^{-1} cm量级,其中 $f \times 10^9$ Hz为微波频率.三维周期性函数结构适用于任意电磁场模式,包括以任意比例混合的横电TE模式和横磁TM模式.

此外,崔万照团队^[53-55]和贺永宁团队^[50-52,56]深入研究周期性金属表面、以及非周期性随机孔洞表面,陷阱束缚电子有效抑制二次电子发射的方法,实现了周期性微表面对金属二次电子倍增的抑制,成功运用到航天器件二次电子倍增的抑制.

2.2 谐振磁场抑制二次电子倍增的方法

满足特定幅度和方向的外加磁场可以抑制真空介质面HPM二次电子倍增^[52,58],该磁场幅度满足 $\Omega \sim \omega$ 、平行于介质表面且垂直于 E_{rf} 电场极化方向.通过动力学计算和PIC模拟,我们得出:倍增电子在 $E_{rf} \times B$ 作用下谐振加速电子使其能量高于第二交叉点 $\varepsilon_c > \varepsilon_{p2}$,实现二次产额小于1;同时 $E_{rf} \times B$ 提高了电子飞行时间 τ 使得 $\tau \sim T$,倍增被稳定地抑制.相同 E_{rf} 场幅度下,当 Ω 接近 ω ,电子获得的谐振能量最高、产额最低、倍增抑制效果最好,减弱或增强磁场,有相对

图5 三维周期余弦函数结构示意图和周期性结构的介质窗及局部放大照片(右上角)^[49]

Figure 5 Three dimensional wavy surface and dielectric window with periodic surface and enlarged figure^[49]

弱的倍增抑制效果.

通过3D动力学模拟发现,电子在 $E_{rf} \times B$ 的多个周期内连续运动的轨迹如图6,可以看出电子具有定向漂移,这是因为电子渡越时间满足 $\tau \sim T$,电子飞行经历两次 $E_{rf} \times B$ 反向,电子碰撞介质面时 E_{rf} 相位与电子从表面发射相位基本相同, $E_{rf} \times B$ 指向远离介质面,新产生的二次电子被迅速拉离表面,且受到的 E_{rf} 方向相同,因此会定向漂移.可看出电子轨迹和能量 $\varepsilon_c(t)$ 的幅度不断降低,是因为电子定向波导壁漂移的过程中,受到的 E_{rf} 场幅度不断降低,在这个过程中,数密度 n_e 不断降低.

Cheng等人^[60]、蔡立兵等人^[61,63]、董烨等人^[64]等分别通过自持PIC代码进一步研究了不同幅度及方向磁场抑制介质面二次电子倍增的机理,得出当外磁场达到一定强度时,窗口微波传输功率容量能够提高4倍以上.

我们设计并研制了满足特定磁场幅度和极化方向、磁场强度均匀的磁路,通过S波段、 μs 脉宽的大功率实验^[58],验证了谐振磁场能够有效提高功率容

图6 倍增电子的统计轨迹^[49]

Figure 6 Statistic trajectory of multipactor electrons under $E \times B$ ^[49]

量达9倍以上、提高击穿阈值在3倍以上；实验发现，阈值的提高与磁场强度有关， $\Omega \sim \omega$ 有最佳的阈值提高效果，减弱或者增强磁场，会有相对低的阈值，理论预测和实验结果一致。并实验证实了周期性表面结构可以和谐振磁场联合使用，显著提高击穿阈值。通过脉冲压缩方法，证实了14 ns短脉冲、100 MW功率下，谐振磁场能够显著提高HPM击穿阈值。

HPM窗口通常要传输几个吉瓦的功率，窗口直径在几十厘米量级，在该区域内保持均匀磁场，对于稳定地抑制整个窗口面的倍增非常重要。然而，常规磁路在大口面下产生横向磁场时有如下缺点：(1) 会产生各向异性的横向磁场，即磁力线不相互平行、有不同方向的磁场分量；(2) 磁场幅度在远离磁极的区域幅度小、越靠近磁极时磁场幅度越大；(3) 再者，难以在一个较大横截面上实现均匀的磁场，且体积和重量巨大。

作者团队提出采用海尔贝克磁铁代替常规磁路，其特征是：提供了一个磁力线方向平行、幅度均匀的横向磁场，它可以在一个较大区域内实现均匀磁场。HPM击穿实验中，采用海尔贝克磁场的辐射场脉宽与不加磁场的辐射场脉宽对比如图7所示，随着注入功率提高，在没有磁场条件下，击穿导致尾蚀逐渐加重、脉宽逐渐减小；采用海尔贝克磁场后，辐射脉宽基本不变，在3 GW功率下辐射场脉宽相比不施加磁场时会宽约15 ns。因此在吉瓦级功率下可显著提高容量达3倍以上^[59]。

3 HPM大气层和窗大气侧击穿

高功率微波在大气层传输过程中，由于气压随

着海拔高度的增加而不断降低，在一定海拔下会发生低气压微波击穿和传输截止的问题。从20世纪50年代至今，不同气压、频段和脉宽下气体击穿阈值和时延规律的研究备受关注，国内外有很多学者和研究小组，已经针对这个问题开展了大量的理论和实验研究，代表性的包括：Gould^[65]，Felsenthal^[66,67]，Tetbaum^[68]，Sullivan^[69,70]，Yee^[71-73]，Ali^[74]，Woo^[75]，Yuri^[76]，Anderson^[77-79]，Liu^[80]，周东方^[81,82]，钱宝良^[83]，Zhao^[88-93]和其他学者^[84-87]等。

气体击穿阈值 E/p 与气压和时延乘积 $p\tau$ 的关系曲线，其中包括：Gould等^[65]研究的连续波、单脉冲和重频脉宽的击穿阈值；Felsenthal^[66,67]研究的气压0.1~760 Torr、频率1~27 GHz、纳秒到百纳秒脉宽的微波击穿规律，并得出：在频率9 GHz、脉宽20 ns和气压0.1 Torr条件下，击穿阈值接近10 kV/cm，被Yee等学者认为是有效准确的实验结果。Ali^[74]实验研究了微秒脉冲微波辐射到大气和容器内气体击穿平均时延与场强的关系曲线。Sullivan^[69,70]等进行了短脉冲3~30 ns、频率9.6 GHz的HPM大气击穿理论和实验研究，通过脉冲缩短和可见光两种判据得到击穿阈值随气压变化的规律，在气压1 Torr、脉宽3 ns的击穿阈值接近10 kV/cm，而气压0.1 Torr、脉宽30 ns的击穿阈值大于4 kV/cm。

Zhao等人将改进的电子能量分布函数引入流体模型，大大提高了击穿预测的精度^[65,89]；实现微波放电等离子体时空演化的快速模拟^[90]；采用一维流体模型及有效的等效扩散系数分析了高功率微波在自组织放电等离子体中的传输、吸收和反射特性^[91]；发现非线性极化微波电场分量相位差和幅度差对击穿

图7 辐射脉宽随辐射功率的变化；红色(没有磁场)；黑色(施加海尔贝克磁场)(a)；无磁场(b)和带Halbach磁场条件下在线波形(c)(曲线1)和辐射脉冲波形在角度4°(曲线2)和0°(曲线3)^[59]

Figure 7 Variation in FWHM of radiation pulse detected in the far field with power level. Red circles (without magnet); black squares (with Halbach-type magnet). Online pulse (Curve 1) and radiation pulses at 4° (Curve 2) and 0° (Curve 3) in the far field for (a) no external magnet and (b) Halbach-type magnet under similar incident power; horizontal scale, 20 ns/div^[59]

形成时间具有明显的影响^[92]；模拟了放电等离子体发光强度随气压的变化，该变化趋势与实验数据符合很好^[93]。

气体/介质界面的HPM击穿要比自由空间下HPM击穿严重，在高空条件下，已成为限制HPM辐射的主要因素，Neuber研究组^[94]对相关问题进行了系统性地理论和实验研究。

通过高速分幅相机诊断了介质/大气界面短脉冲高功率微波放电产生可见光的时空分布^[98]。在微波到达输出窗之前的初始阶段，没有监测到光。2 ns以后，光发射聚集在介质表面2 mm薄层内，说明早期放电只在介质表层附近发生。5 ns时，对应微波脉冲上升沿，介质表层发光强度增加，并有两个相对较低亮度、几个厘米长的光发射区域，并沿着微波传播的反方向不断发展，如图8(a)所示。在高功率脉冲顶部和下降沿的时间段内，介质表面和临近空间的发光强度与发射区域进一步增加，如图8(b)所示。在高功率微波脉冲结束后，空间等离子体快速熄灭，强光仅在表层几个毫米厚度内发射，如图

8(c)所示。在整个区域的等离子体完全熄灭之前，发光区域收缩成为明亮的薄细丝状，如图8(d)所示，这来源于等离子体鞘层在崩塌前的持续电离，且丝状鞘层内的光强要远低于高功率微波脉冲时的亮度。

4 HPM金属表面击穿

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；当局部场强超过金属表面发射阈值(100 MV/m量级)，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，并以较高功率流密度轰击金属表面；电子诱导气体脱附，在表面气体层中发生等离子体放电^[5]；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，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，而由此产生的持续热应力将引起器件的损伤。

在幅度100 MV/m量级的强电磁场作用下，电子能

图8 高功率微波所致大气/介质界面击穿发光的发展和演化。(a)~(d) 时序为5 ns, 10 ns, 20 ns和25 ns^[98]

Figure 8 Development and evolution of the HPM window surface breakdown. The times are (a) 5 ns, (b) 10 ns, (c) 20 ns, and (d) 25 ns images of visible light in pseudocolor^[98]

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、强导引磁场区域起作用. 在空间电荷场作用下, 离子被加速获得高能^[99,100], 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.

孙钧、宋炜、曹亦兵等学者^[101-104]结合大量实验现象开展了长期的理论研究, 认为在高频结构强电磁场击穿中, 存在二种机制: 第一种是由于被强电磁场过减速后的慢电子扩散和被电磁场(包括空间电荷场和射频场)加速后对高频结构轰击产生二次电子或等离子体; 第二种是来自于强电场区域的强场致发射电子对“阳极”的轰击产生二次电子和材料释气, 可简称为“阳极机制”, 在一些情况下, 当电子被电场加速至足够高的能量(如数百keV)时, 将发生“阳极”材料烧蚀气化, 伴随大量等离子体. 这两种机制有时独立起作用, 有时共同作用.

针对高频结构击穿机理, 国防科技大学的张军等^[105]认为强场条件下高频结构表面的爆炸电子发射, 以及解吸附气体在二次电子轰击下的电离是引起高频结构强电磁场击穿的主要原因. 国防科技大学在过模相对论返波管中, 将高频结构表面的电场强度控制在1 MV/cm以下(在2.3 GW输出功率水平下, 最大轴向场强控制在700 kV/cm以内).

5 高功率微波击穿研究展望

在高功率微波击穿机理研究方面, 国内外已对基本物理过程进行了定性描述, 基本建立了二次电子倍增、表面气体释放及等离子体雪崩的动理学模型, 但缺乏定量描述和实验数据支撑. 未来需要研究窗口、大气、金属表面强场击穿时等离子体的产生及发展规律, 对等离子体能谱时空分布、等离子体密度时空分布、表面气体成分、电场时空分布等进行系统研究, 再根据实验结果, 建立强电磁场击穿的完整物理动理学模型.

在结构改进、新型材料研究和工艺处理方面, 国内外在此方面开展了深入研究, 周期性表面、谐振磁场、表面氟化等物理和化学方法已经成功运用到抑制击穿、提高窗表面功率容量的技术中. 但抑制击穿的方法和手段还不完善, 特别是抑制金属表面击穿的方法尚待探索, 总体上离实用化还有不少差距. 由于高功率微波强场击穿的复杂性、特殊性, 在结构优化的同时, 有必要建立表面精细结构加工工艺、长寿命的表面处理技术, 以有效抑制二次电子发射、场致电子发射, 在此基础上, 通过采用特定性能(二次电子产额低、导热良好、耐受强X射线辐射等)的新材料和规范的老练工艺, 高温烘烤技术, 有效地去除表面杂质和吸附气体, 最终达到长效抑制击穿的目的.

参考文献

- Robert J B, Edl S. High-Power Microwave Sources and Technologies (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 27-29, 424-431 [Robert J B, Edl S. 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. 27-29, 424-431]
- Zhou C M, Liu G Z, Liu Y G, et al. High-Power Microwave Sources(in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2007 [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]
- James B, John A S, Edl S. High-Power Microwave (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 2009 [James B, John A S, Edl S. 高功率微波. 江伟华, 张弛译. 北京: 国防工业出版社, 2009]
- Sergei D K, Ivan K, Sergey L, et al. Decimeter-band frequency-tunable sources of high-power microwave pulses. Laser Part Beams, 2003, 21: 175-185
- Chang C. Breakdown Physics in High-Power Microwave Systems (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [常超. 高功率微波系统中的击穿物理. 北京: 科学出版社, 2016]
- Kishek R A, Lau Y Y. Multipactor discharge on a dielectric. Phys Rev Lett, 1998, 80: 193-196
- Kishek R A, Lau Y Y, Ang L K, et al. Multipactor discharge on metals and dielectrics: Historical review and recent theories. Phys Plasmas, 1998, 5: 2120-2126
- Ang L K, Lau Y Y, Kishek R A, et al. Power deposited on a dielectric by multipactor. IEEE Trans Plasma Sci, 1998, 26: 290-295
- Kim H C, Verboncoeur J P. Transition of window breakdown from vacuum multipactor discharge to rf plasma. Phys Plasmas, 2006, 13: 123506-6
- Kim H C, Verboncoeur J P, Lau Y Y. Invited paper: Modeling RF window breakdown: from vacuum multipactor to RF Plasma. IEEE

Trans Dielectr Electr Insu, 2007, 14: 766–773

- 11 Cheng G, Liu L, Liu Y, et al. Monte Carlo study of the single-surface multipactor electron discharge on a dielectric. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2009, 37: 1968
- 12 Vaughan J. Multipactor. *IEEE Trans Electron Devices*, 1988, 35: 1172–1180
- 13 Chang C, Liu G Z, Tang C X, et al. The influence of desorption gas to high power microwave window multipactor. *Phys Plasmas*, 2008, 15: 093508
- 14 Zhang P, Lau Y Y, Franzi M, et al. Multipactor susceptibility on a dielectric with a bias dc electric field and a background gas. *Phy Plasmas*, 2011, 18: 1172
- 15 Valfells A, Verboncoeur J P, Lau Y Y. Space charge effects on multipactor on a dielectric. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2000, 28: 529–536
- 16 Chang C, Liu G Z, Tang C X, et al. Space charge shielding on dielectric multipactor. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 053506
- 17 Chang C, Liu G Z, Zhu X X, et al. Improved model for window breakdown at low pressure. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 033505
- 18 Chang C, Shao H, Chen C H, et al. Single and repetitive short-pulse high-power microwave window breakdown. *Phys Plasmas*, 2010, 17: 053301
- 19 Cai L B, Wang J G. Numerical simulation of high power microwave breakdown on medium surface (in Chinese). *J Phys*, 2009, 58: 3268 [蔡利兵, 王建国. 介质表面高功率微波击穿数值模拟. *物理学报*, 2009, 58: 3268]
- 20 Cai L B, Wang J G, Zhu X Q. Numerical Simulation of High Power Microwave Breakdown on Medium Surface Under Different Pressure (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2010, 22: 2363–2368 [蔡利兵, 王建国, 朱湘琴. 不同气压下介质表面高功率微波击穿的数值模拟. *强激光与粒子束*, 2010, 22: 2363–2368]
- 21 Cai L B, Wang J G. Numerical simulation of gas release in high power microwave breakdown on medium surface (in Chinese). *J Phys*, 2011, 60: 025217 [蔡利兵, 王建国. 介质表面高功率微波击穿中释气现象的数值模拟研究. *物理学报*, 2011, 60: 025217]
- 22 Cai L B, Wang J G, Zhang D H, et al. Self-consistent simulation of the initiation of the flashover discharge on vacuum insulator surface. *Phys Plasmas*, 2012, 19: 073516
- 23 Wang J G, Cai L B, Zhu X Q, et al. Numerical simulations of high power microwave dielectric interface breakdown involving outgassing. *Phys Plasmas*, 2010, 17: 063503
- 24 Dong Y, Dong Z W, Zhou Q H, et al. The particle simulation of the influence of gas release on dielectric flashover (in Chinese). *J Phys*, 2014, 63: 027901 [董烨, 董志伟, 周前红, 等. 释气对介质沿面闪络击穿影响的粒子模拟. *物理学报*, 2014, 63: 027901]
- 25 Dong Y, Dong Z W, Zhou Q H, et al. The method of simulation the ionization parameter particle of the surface flashover fluid model (in Chinese). *J Phys*, 2014, 63: 067901 [董烨, 董志伟, 周前红, 等. 沿面闪络流体模型电离参数粒子模拟确定方法. *物理学报*, 2014, 63: 067901]
- 26 Dong Y, Zhou Q H, Dong Z W, et al. Particle simulation of high power microwave dielectric breakdown mechanism (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 950–958 [董烨, 周前红, 董志伟, 等. 高功率微波沿面闪络击穿机制粒子模拟. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 950–958]
- 27 Dong Y, Dong Z W, Zhou Q H, et al. The influence of high power microwave and material characteristic parameters on the flashover and breakdown of the surface (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 5 [董烨, 董志伟, 周前红, 等. 高功率微波及材料特性参数对沿面击穿的影响. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 5]
- 28 Hao X W, Song B P, Zhang G J. The research progress on the breakdown phenomenon of high power microwave dielectric window (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2012, 24: 16–23 [郝西伟, 宋佰鹏, 张冠军. 真空高功率微波介质窗表面击穿破坏现象的研究进展. *强激光与粒子束*, 2012, 24: 16–23]
- 29 Hao X W, Song B P, Zhang G J. PIC-MCC Simulation for HPM Multipactor discharge on dielectric surface in vacuum. *Plasma Sci Technol*, 2011, 13: 682
- 30 Qiu S, Hao X W, Zhang G J, et al. Tree-like breakdown phenomena of dielectric window under x-band high power microwave in vacuum. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2010, 17: 1070–9878
- 31 Hao X W, Zhang G J, Qiu S, et al. Investigation on dielectric window treelike breakdown and suppression under HPM in vacuum. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2010, 38: 1403
- 32 Neuber A, Krompholz H, Butcher M, et al. The role of outgassing in surface flashover under vacuum. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2000, 28: 1593–1598
- 33 Neuber A, Dickens J, Hemmert D, et al. Window breakdown caused by high-power microwaves. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, 26: 296–303
- 34 Saito Y, Matuda N, Anami S, et al. Breakdown of alumina RF windows. *IEEE Trans Electr Insul*, 1989, 24: 1029–1032
- 35 Michizono S, Saito Y, Yamaguchi S, et al. Dielectric materials for use as output window in high-power klystrons. *IEEE Trans Electr Insul*, 1993, 28: 692–701
- 36 Chang C, Zhu M, Verboncoeur J, et al. Enhanced window breakdown dynamics in a nanosecond microwave tail pulse. *Appl Phys Lett*,

- 2014, 104: 253504
- 37 Cheng G, Liu L. Temporal evolution of multipactor electron discharge on a dielectric under excitation of high-power microwave. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 1067–1074
- 38 Chang C, Huang H J, Liu G Z, et al. The effect of grooved surface on dielectric multipactor. *J Appl Phys*, 2009, 105: 1593
- 39 Chang C, Liu G Z, Huang H J, et al. Suppressing high-power microwave dielectric multipactor by the sawtooth surface. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 083501
- 40 Chang C, Liu G Z, Fang J Y, et al. Field distribution, HPM multipactor and plasma discharge on the periodic triangular surface. *Laser Part Beams*, 2010, 28: 185–193
- 41 Chang C, Liu G, Tang C, et al. Review of recent theories and experiments for improving high-power microwave window breakdown thresholds. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 055502
- 42 Li S, Chang C, Wang J G, et al. Tracking multiple generation and suppression of secondary electrons on periodic triangular surface. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 1172–1180
- 43 Chen C H, Chang C, Liu W Y, et al. Improving the microwave window breakdown threshold by using a fluorinated, periodically patterned surface. *J Appl Phys*, 2013, 114: 766–1406
- 44 Dong Y, Dong Z W, Yang W Y, et al. The dielectric surface grooves inhibit the secondary electron multiplication monte-carlo simulation (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 399–406 [董烨, 董志伟, 杨温渊, 等. 介质面刻槽抑制二次电子倍增蒙特卡罗模拟, *强激光与粒子束*, 2013, 25: 399–406]
- 45 Cheng G X, Cai D, Hong Z Q. Variation in time lags of vacuum surface flashover utilizing a periodically grooved dielectric. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2013, 20: 1942–1950
- 46 Zhang H B, Yang J H, Cheng G X. The secondary electron multiplier effect of high-power microwave output window of groove structure (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 1189–1194 [张慧博, 杨建华, 程国新. 刻槽结构高功率微波输出窗次级电子倍增效应. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 1189–1194]
- 47 Cheng G X, Cheng X B, Yang J, et al. The optical characteristics of the vacuum surface flashover of the groove insulator (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 1205–1210 [程国新, 程新兵, 杨杰, 等. 刻槽绝缘子真空表面闪络光学特性. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 1205–1210]
- 48 Zhang X, Wang Y, Fan J J. The suppression effect of a periodic surface with semicircular grooves on the high power microwave long pill-box window multipactor phenomenon. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 092101
- 49 Chang C, Liu Y S, Verboncoeur J, et al. The effect of periodic wavy profile on suppressing window multipactor under arbitrary electromagnetic mode. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 014102
- 50 Ye M, He Y N, Hu S G, et al. Suppression of secondary electron yield by micro-porous array structure. *J Appl Phys*, 2013, 113: 7
- 51 Fan Z, Chang C, Sun J, et al. Experimental demonstration of improving resonant-multipactor threshold by three-dimensional wavy surface. *Appl Phys Lett*, 2017, 111: 123503
- 52 Ye M, He N Y, Hu S G, et al. Investigation into anomalous total secondary electron yield for micro-porous Ag surface under oblique incidence conditions. *J Appl Phys*, 2013, 114: 104905
- 53 Li Y, Cui W Z, Zhang N, et al. Three-dimensional simulation method of multipactor in micro-wave components for high-power space application. *Chin Phys*, 2014, B23: 048402
- 54 Li Y, Cui W Z, Wang H G. Simulation investigation of multipactor in metal components for space application with an improved secondary emission model. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 053108
- 55 Cui W Z, Li Y, Yang J, et al. An efficient multipaction suppression method in microwave components for space application (in Chinese). *Chin Phys B*, 2016, 6: 569–574 [崔万照, 李韵, 杨晶, 等. 一种有效多分量抑制方法在微波成分的空间应用. *中国物理 B*, 2016, 6: 569–574]
- 56 Li Y, Ye M, He Y N, et al. Surface effect investigation on multipactor in microwave components using the EM-PIC method. *Phys Plasmas*, 2017, 24: 113505
- 57 Chang C, Liu G, Tang C, et al. Suppression of high-power microwave multipactor by resonant magnetic field. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 111502
- 58 Chang C, Fang J Y, Zhang Z Q, et al. Experimental verification of improving high-power microwave window breakdown thresholds by resonant magnetic field. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 141501
- 59 Chang C, Liu Y S, Ouyang X P, et al. Demonstration of Halbach-like magnets on improving microwave window capacity at Giga-Watt leve. *Appl Phys Express*, 2014, 7: 097301
- 60 Cheng G X, Liu L. Electromagnetic particle-in-cell verification of improving high-power microwave window breakdown thresholds by resonant magnetic field. *App Phys Lett*, 2013, 102: 243506

- 61 Cai L B, Wang J G, Zhu X Q. Suppression of multipactor discharge on a dielectric surface by an external magnetic field. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 7
- 62 Cai L B, Wang J G, Zhu X Q, et al. The influence of magnetic field on secondary electron multiplier effect on medium surface (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 075101 [蔡利兵, 王建国, 朱湘琴, 等. 磁场对介质表面次级电子倍增效应的影响. *物理学报*, 2012, 61: 075101]
- 63 Cai L B, Wang J G. The effect of microwave magnetic field and oblique incidence on secondary electron multiplication (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2010, 59: 1143–1147 [蔡利兵, 王建国. 微波磁场和斜入射对次级电子倍增的影响. *物理学报*, 2010, 59: 1143–1147]
- 64 Dong Y, Dong Z W, Zhou Q H, et al. Two kinds of external magnetic fields inhibit the secondary electron multiplication of the dielectric surface (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 2653–2658 [董烨, 董志伟, 周前红, 等. 两种外磁场形式对介质面次级电子倍增的抑制. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 2653–2658]
- 65 Gould L, Roberts L W. Breakdown of air at microwave frequencies. *J Appl Phys*, 1956, 27: 1162–1170
- 66 Felsenthal P, Proud J M. Nanosecond-pulse breakdown in gases. *Phys Rev*, 1965, 139: 1796–1804
- 67 Felsenthal P. Nanosecond-pulse microwave breakdown in air. *J Appl Phys*, 1966, 37: 4557–4560
- 68 Tetanbaum S J, Macdonald A D. Pulsed Microwave Breakdown of Air from 1 to 1000 Torr. *J Appl Phys*, 1971, 42: 5871–5872
- 69 Sullivan C A, Destler W W, Rodgers J, et al. Short -pulse high-power microwave propagation in the atmosphere. *J Appl Phys*, 1988, 63: 5288–5292
- 70 Mulbrandon M J, Chen J, Palmadesso P J, et al. A numerical solution of the Boltzmann equation for high-powered short pulse microwave breakdown in nitrogen. *Phys Fluids B*, 1989, 1: 2507–2515
- 71 Bollen W M, Yee C L, Ali A W, et al. High-power microwave energy coupling to nitrogen during breakdown. *J Appl Phys*, 1982, 54: 101–106
- 72 Yee J H, Mayhall D J, Sieger G E. Modeling the Interaction of intense electromagnetic pulses with gaseous media. *IEEE trans Electromagn C*, 1992, 34: 189–196
- 73 Khanaka G H, Yee J H, Mayhall D J. Modeling the Propagation of long, intense microwave pulses in mixtures of air and SF₆. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1990, 18: 210–213
- 74 Ali A W. Nanosecond air breakdown parameters for electron and microwave beam propagation. *Laser Part Beams*, 1988, 6: 105–117
- 75 Woo W, DeGroot J S. Microwave absorption and plasma heating due to microwave breakdown in the atmosphere. *Phys Fluids*, 1984, 27: 475–487
- 76 Raizer Y P. *Gas Discharge Physics*. Berlin: Springer Press, 1991
- 77 Anderson D, Lisak M. Breakdown in air-filled microwave waveguides during pulsed operation. *J Appl Phys*, 1984, 56: 1414–1419
- 78 Lbfgren M, Anderson D, Lisak M, et al. Breakdown-induced distortion of high-power microwave pulse in air. *Phys Fluids*, 1991, 3: 3528–3532
- 79 Udiljak R, Anderson D, Lisak M, et al. Improved model for multipactor in low pressure gas. *Phys Plasmas*, 2004, 11: 5022–5031
- 80 Liu G Z, Liu J Y, Huang W H, et al. A study of high power microwave air breakdown. *Chin Phys Soc*, 2000, 9: 757–760
- 81 Zhou D F, Yu D J, Ning H, et al. Distribution of High-Power Microwave Atmospheric Breakdown Area (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2014, 26: 063026 [周东方, 余道杰, 宁辉, 等. 高功率微波大气击穿区域分布. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 063026]
- 82 Zhou D F, Yu D J, Yang J H, et al. Theoretical and experimental study of high power microwave single pulse atmospheric breakdown based on atmospheric model (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 014207 [周东方, 余道杰, 杨建宏, 等. 基于混合大气模型的高功率微波单脉冲大气击穿理论与实验研究. *物理学报*, 2013, 62: 014207]
- 83 Yang Y M, Yuan C W, Qian B L. Gas breakdown driven by L band short-pulse high-power microwave. *Phys Plasmas*, 2012, 19: 122101
- 84 Wang H, Meng L, Liu D, et al. Rescaling of microwave breakdown theory for monatomic gases by particle-in-cell/Monte Carlo simulations. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 122102
- 85 Qiu F, Yan E Y, Meng F B, et al. Analysis based on global model of nitrogen plasma produced by pulsed microwave at low pressure. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 073506
- 86 Zhao G, Yan E Y, Chen C Y, et al. Analysis and experiment of high-power microwave atmospheric breakdown threshold (in Chinese). *High Power Part Beams*, 2013, 25: 111–114 [赵刚, 闫二艳, 陈朝阳, 等. 高功率微波大气击穿阈值分析及实验. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 111–114]
- 87 Zhang C, Tarasenko V F, Shao T, et al. Generation of supershort avalanche electron beams in SF₆. *Laser Part Beams*, 2014, 32: 331–341
- 88 Zhao P C, Liao C, Lin W B, et al. Numerical studies of the high power microwave breakdown in gas using the fluid model with a modified electron energy distribution function. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 102111
- 89 Zhao P C, Liao C, Yang D, et al. Validity of the two-term Boltzmann approximation employed in the fluid model for high-power microwave breakdown in gas. *Chin Phys B*, 2014, 23: 055101

- 90 Zhao P C, Feng J, Liao C. Breakdown in air produced by high power microwaves. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 1560–1566
- 91 Zhao P C, Guo L X, Shu P P. Interaction of high-power microwave with air breakdown plasma at low pressure. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 092105
- 92 Zhao P C, Guo L X. Numerical simulations of air breakdown by microwave with two orthogonal electric fields. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2018, 46: 489–493
- 93 Zhao P C, Chang C, Guo L X, et al. Effects of pressure and incident field on visible light intensity from microwave nitrogen breakdown. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 022104
- 94 Krile J, Neuber A, Dickens J, et al. Imaging of dielectric surface flashover in atmospheric conditions. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2005, 33: 270–271
- 95 Chang C, Verboncoeur J, Wei F L, et al. Nanosecond discharge at the interfaces of flat and periodic ripple surfaces of dielectric window with air at varied pressure. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2017, 24: 1
- 96 Chang C, Li Y D, Verboncoeur J, et al. Suppressing double-metal-surface resonant multipactor by three dimensional wavy. *Phys Plasmas*, 2017, 24: 040702
- 97 Chang C, Wu C, Pu Y P, et al. Diagnostic of ultrafast temporal plasma evolution in high-power microwave discharge. *J Appl Phys*, 2017, 121: 213301
- 98 Chang C, Verboncoeur J, Guo M N, et al. Ultrafast high power microwave window breakdown: Nonlinear and post-pulse effects. *Phys Rev E*, 2014, 90: 063107
- 99 Chang C, Liu C L, Chen C H, et al. The influence of ions and the induced secondary emission on the nanosecond high gradient microwave breakdown at metal surface. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 06351
- 100 Chang C, Guo L T, Liu C L, et al. Nanosecond snapshots of high-power microwave discharge in waveguides. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2015, 43: 1887
- 101 Song W, Chen C H, Zhang L G, et al. A dual-resonant reflector in powerful relativistic backward wave oscillator. *Phys Plasma*, 2011, 18: 063105
- 102 Song W, Sun J, Song Z M, et al. Suppressing RF breakdown of powerful backward wave oscillator by field redistribution. *AIP Adv*, 2012, 2: 012118
- 103 Cao Y B, Song Z M, Wu P, et al. Effective suppression of pulse shortening in a relativistic backward wave oscillator. *Phys Plasma*, 2017, 24: 033109
- 104 Cao Y B, Sun J, Teng Y, et al. A powerful reflector in relativistic backward wave oscillator. *Phys Plasma*, 2014, 21: 093106
- 105 Zhang J, Jin Z X, Yang J H, et al. Recent advance in long-pulse HPM sources with repetitive operation in S-, C- and X-bands. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 1438–1445

Summary for “高功率微波等离子体放电研究进展”

High power microwave plasma discharge

Chao Chang^{1,2}

¹Advanced Interdisciplinary Technology Research Center, National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100071, China;

²Key Laboratory of Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

E-mail: changc@xjtu.edu.cn

High-power microwave (HPM) has broad applications in scientific research, civil and military community. HPM has the character of peak power of tens of Giga-Watt and the pulse width from tens of to hundreds of nanosecond. The intense electromagnetic breakdowns in the HPM generation, transmission and radiation systems, seriously limit the HPM systematic power capacity, and become the bottle neck of the HPM technology-development and the international technical challenge.

In this paper, the recent developments of intense electromagnetic breakdown at vacuum and air sides of output window and on metal surfaces are reviewed and discussed. To understand the breakdown mechanism at window, several multipactor dynamic models are developed, especially involving electron-neutral collision and ionization in the desorbed gas layer, analytically obtaining the influence of desorption gas on multipactor saturation, and space charge field and potential distribution above dielectric surface formed by multipactor and plasma. By diagnosing the time- and space-evolution optical emissions, the mechanisms of nano-second microwave-driven discharges near the dielectric/vacuum and dielectric/air interface were discussed. For breakdown at the dielectric/vacuum interface, multipactor and plasma developing in a thin layer of several millimeters above interface, revealing intense ionization concentrated in a desorbed high-pressure layer.

For breakdown at the dielectric/air interface, nonlinear positive feedback of formation of a space-charge microwave sheath near the dielectric surface, accelerated by the normal components of the microwave field, significantly enhances the local-field amplitude and hence ionization near the dielectric surface.

The mechanism and methods of using magnetic field satisfying specific amplitude and direction perpendicular to $E_{rf} \times E_{dc}$ to suppress microwave multipactor were theoretically studied and experimental demonstrated. The methods of the external resonant magnetic field have been demonstrated by proof-of principle S-band large power experiments to significantly improve the power capacity by 9 times. The Halbach-like magnets to generate the transverse homogeneous B-field in a large scale was designed to suppress multipactor, and the window breakdown threshold was significantly enhanced at multi-Giga-watt.

The methods of periodic surface profiles on suppressing microwave multipactor were discussed. The three-dimensional periodic ripple profile with each unit of rotational symmetric surface is proposed and theoretically and experimentally demonstrated to suppress multipactor for arbitrary electromagnetic mode with any polarization.

In theoretical aspect, basic physics courses are described qualitatively, the basic models of secondary electron multipactor, gas desorption and plasma avalanche are established, but lack of quantitative results and experimental diagnostic of plasma energy and density. The physical and chemical methods of periodic surface, resonant magnet, and surface fluorination are successfully used in suppressing breakdown and improving the power capacity, but there is distance away from practical application.

high-power microwave, intense electromagnetic breakdown, plasma, window discharge, air discharge, metal discharge

doi: 10.1360/N972018-00272