

文章编号: 2095-4980(2022)01-0058-09

真空电子器件输出窗次级电子倍增效应研究进展

张雨婷, 崔万照

(中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要: 真空电子器件在毫米波和太赫兹波频段具有大功率的天然优势, 可用于构建高效率、大功率的毫米波和太赫兹辐射源, 对高功率微波技术及太赫兹技术的发展具有十分重要的意义。输出窗是真空电子器件的关键部件, 输出窗击穿是器件失效的主要原因之一, 而次级电子倍增效应被认为是输出窗击穿的主要原因。本文梳理了目前分米波及厘米波波段真空电子器件输出窗的研究现状, 在此基础上梳理了这一领域未来研究的主要发展方向, 以期对未来真空电子器件向更高功率和更高频率等级发展提供参考。

关键词: 真空电子器件; 毫米波; 太赫兹; 输出窗; 次级电子倍增效应

中图分类号: TN101

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021033

Research progress of secondary electron emission effect in output window of vacuum electronic devices

ZHANG Yuting, CUI Wanzhao

(Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology, Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: Vacuum electronic devices, with the natural advantage of high power in millimeter wave and terahertz bands, can be applied to construct high-efficiency and high-power radiation sources. This is of great significance to the development of high-power microwave technology and terahertz technology. The output window is one of the key components of vacuum electronic devices. The breakdown of the output window mainly accounts for the failure of the devices. The multipactor is considered as the main reason for the breakdown of the output window. This paper summarizes current advances of output window in the decimeter and centimeter-wave bands. On this basis, the tendencies of this research fields are predicted in order to provide reference for the future development of vacuum electronic devices in higher power and higher frequency levels.

Keywords: vacuum electronic devices; millimeter wave; terahertz; output window; multipactor

真空电子器件和固态功率器件是常用的微波功率器件。相比固态功率器件, 真空电子器件在大功率、高频段的应用方向上具有高峰值功率、高平均功率和大带宽等优点^[1], 是产生高功率毫米波和太赫兹波辐射的重要手段。常见的真空电子器件有回旋管、扩展相互作用速调管、行波管等。国际上对回旋管的研究主要侧重于大型受控热核聚变装置的 100~170 GHz 的兆瓦级回旋管, 相关研究机构有德国卡尔斯鲁厄技术物理研究中心^[2]、俄罗斯应用物理研究所^[3]、美国通信与功率工业公司^[4]、麻省理工学院^[5]以及日本国际原子能机构^[6]等。在成像雷达和人员拒止等需求的推动下, 扩展相互作用速调管取得了长足发展, 美国通信与功率工业等公司已有多个型号的成品管型开始销售^[7], 频率也已经发展到 350 GHz 以上。相比其他真空电子器件, 行波管的应用最为广泛, 除了作为功率放大器应用在几乎所有的通信卫星系统和大多数雷达系统以外, 行波管还可作为类似回旋管这类高功率微波器件的激励源使用。虽然国内毫米波和太赫兹真空电子器件的研究起步较晚, 但目前已有电子科技大学、清华大学、中国工程物理研究院、中国电子科技集团公司第十二研究所等多家单位针对这一领域展开了深入研究^[8-18], 为未来实现高速通信、高分辨力雷达系统、毫米波主动拒止等系统的实际应用奠定了基础。

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-02-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(U1537211); 国家自然科学基金资助项目(61701394; 11705142; 51675421; 11675278); 空间微波技术重点实验室基金资助项目(6142411010101)

对于大多数真空电子器件,输出窗都是其中的关键部件,其性能好坏会直接影响器件的频带特性、功率容量、可靠性和使用寿命等。由真空电子器件输出功率水平提高所引发的介质窗片表面闪络击穿,极大影响了高功率微波(High Power Microwave, HPM)及太赫兹相关系统的实用化进程。研究发现,次级电子倍增效应是导致输出窗真空-介质界面击穿的重要原因^[19-21],研究高功率真空电子器件输出窗次级电子倍增效应产生的机理及其抑制方法,有助于进一步提升器件的输出功率等级和可靠性。

1 输出窗次级电子倍增效应理论及实验研究

1.1 理论分析及数值模拟研究

R A Kishek 和 Y Y Lau 在假定二次电子发射系数 δ 满足 Vaughan 公式的前提下,采用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)模拟的方法对单介质表面次级电子倍增的物理过程进行模拟^[22-23]。该模型假定窗片上的电荷和直流电场稳定不变,分析了当射频电场与介质表面平行时的次级电子倍增过程,最终得到介质表面次级电子倍增的敏感性曲线以及高频、高场强条件下介质表面发生击穿的粗略判据。Verboncoeur 团队利用宏粒子法(Particle in Cell, PIC)和 MC 相结合的方法,对单表面的电子倍增过程进行模拟。相比 R A Kishek 和 Y Y Lau 的研究,Verboncoeur 团队同时考虑了静电场在时间和空间上的变化对电子倍增过程的影响^[24],仿真结果如图 1 所示,其中 $E_{x,wall}$ 和 $E_{y,DC}$ 为表面静电场, $E_{y,RF}$ 为微波电场。更为重要的是,该模拟结果得到了倍增电子数目和表面静电场以 2 倍于微波频率随时间变化的规律,这一规律也被后续研究者所证明^[25-27]。

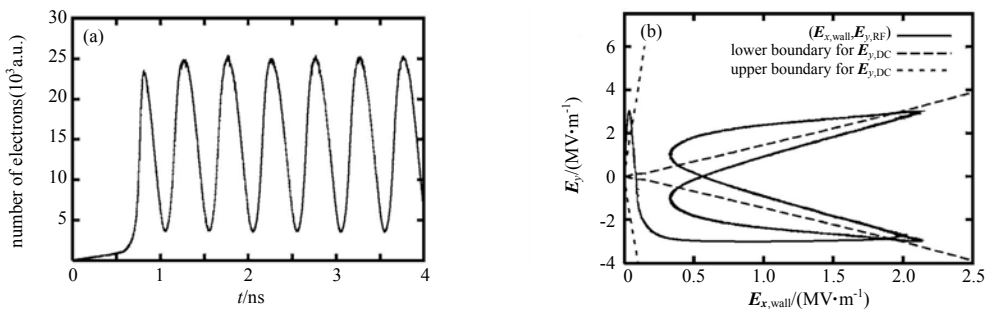


Fig.1 Temporal evolution and susceptibility diagram for the number of multipactor electrons
图 1 倍增电子数目时间变化曲线及敏感性曲线

西安交通大学的张冠军课题组利用宏粒子法建立了真空中高功率微波作用下介质表面电子运动状态的二维仿真模型,系统研究了电子出射的初始角度和微波场参数(如电场幅值、频率以及电子出射时电场相位等)对电子运动轨迹的影响规律^[26]。图 2 为电子运动轨迹、撞击能量及返回时间随电子出射角度的变化曲线,从图 2(a)可以看出,电子出射的初始角度对其运动轨迹有显著影响;结合图 2(b)可以看出,当出射角度与介质表面越接近时,出射角度越小,其撞击能量也越小,撞击能量的最大值出现在出射角度 100° 附近,这是由于该角度对应的电子的运动路程最长,因而电子从高频微波场中获得的能量也最大;如图 2(c)所示,电子返回时间随电子出射的初始角度的变化规律与撞击能量类似,电子返回时间的最大值出现在出射角度 90° 附近。微波场参数对电子运动轨迹的影响可概括为:随着微波电场幅值的增加,电子撞击能量明显增加,而电子返回时间则略有减少。此外,该研究同时得到了撞击能量和返回时间随电子出射时的微波场相位也均以 2 倍于微波频率呈现周期振荡的规律。

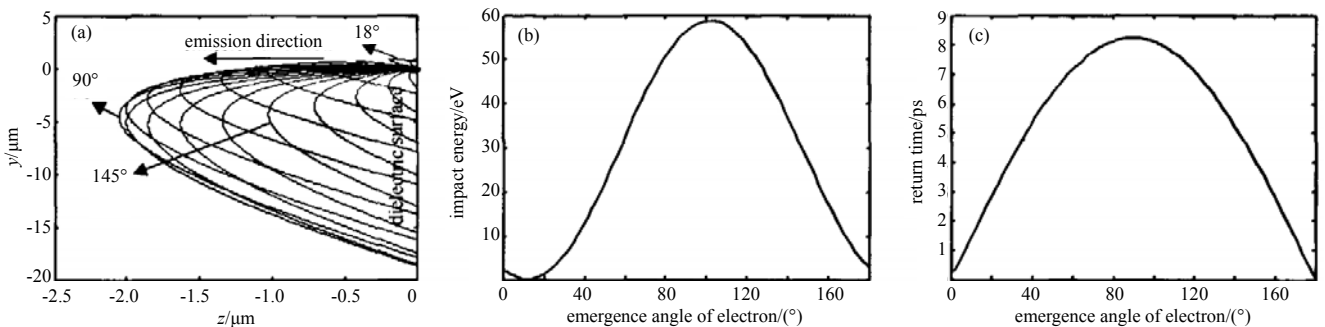


Fig.2 Change of electron movement state with different emergence angle
图 2 电子运动状态随电子出射角度的变化规律

近年来研究人员运用典型的 PIC-MC 程序将介质表面放电研究拓展到非真空环境^[25], 仿真研究了在氩气环境下介质表面电子和离子的变化规律^[27], 以及不同氩气气压条件下电子与背景气体碰撞电离的转换过程^[25], 研究发现介质窗击穿更容易发生在具有一定气体压强的条件下^[28]。

张雪团队针对工作模式、低能电子入射以及极化方式等因素对介质窗片次级电子倍增效应的影响展开了持续研究^[29-33]。文献[30]针对同时存在 TE_{11} 模和 TM_{11} 模的 S 波段盒型窗内的次级电子倍增效应进行了 MC 模拟分析, 结果表明, TM_{11} 模法向场的存在改变了窗片表面次级电子倍增的轨迹, 使盒型窗内次级电子倍增的电场阈值上限降低。文献[32]基于 MC 算法对比了经典的 Vaughan 模型、Vincent 模型和 Rice 模型下输出窗次级电子倍增效应的差异, 研究结果表明, 当法向电场强度较高时, 低能电子几乎垂直入射窗片表面, Vincent 模型将其视为弹性电子, 可避免低能电子损失从而准确得到倍增混叠区域, 这一研究为后续利用模型进行实际应用中介质窗的放电阈值估算及 HPM 器件输出窗设计提供了理论依据。文献[33]针对 11.4 GHz 的圆柱形陶瓷窗片讨论了极化方式对次级电子倍增效应的影响, MC 模拟结果表明圆极化 TE_{11} 模式的次级电子倍增效应比线极化 TE_{11} 模式更严重。

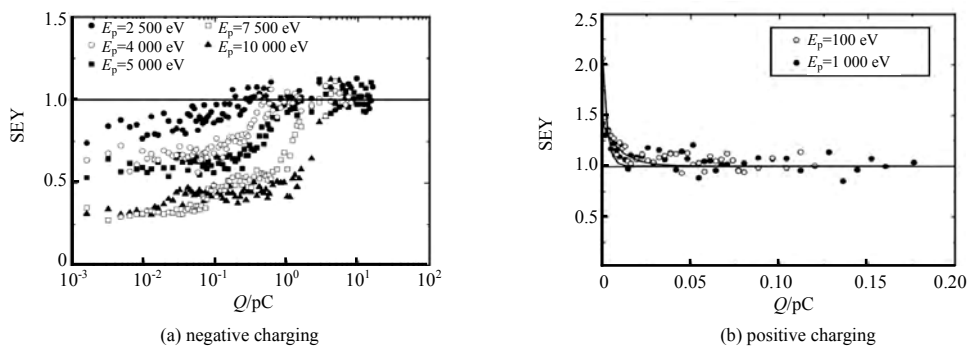


Fig.3 Dynamic characteristics of SEY under positive and negative charging states due to different energy electron irradiation
图 3 不同能量电子照射导致的正负带电状态下二次电子发射产额动态特性

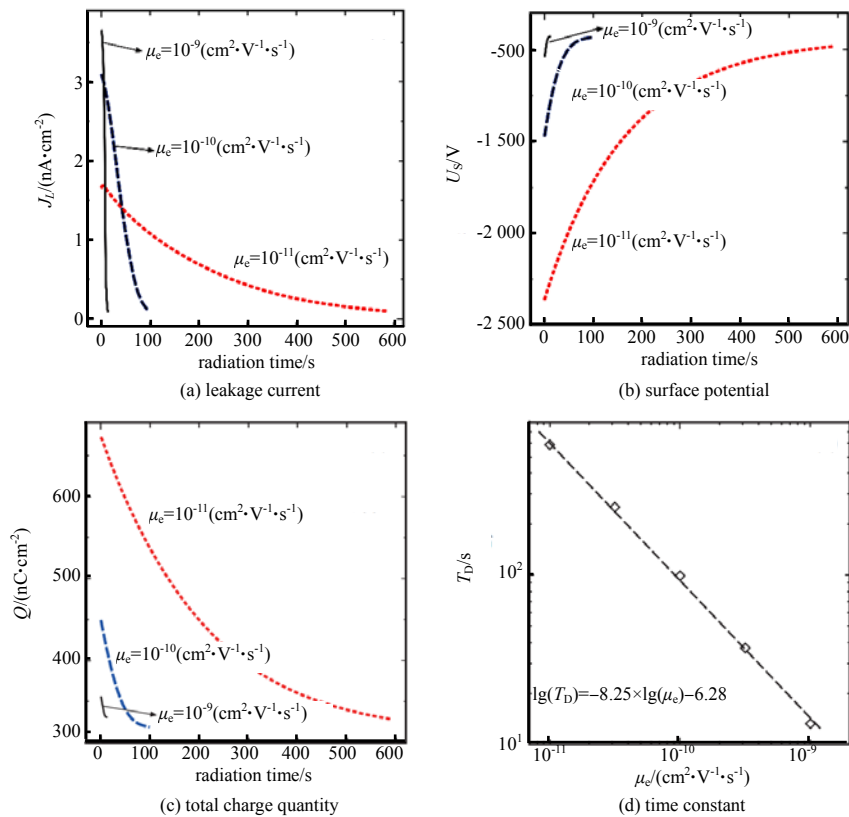


Fig.4 Effect of electron mobility on discharge transient

图 4 电子迁移率对泄放相关暂态特性的影响

由于介质具有较高的绝缘性,当电子束与介质表面相互作用时,介质表面产生的电荷不能以电流的形式流走,因此会在介质表面产生电荷的积累,并感应出对应强度的电场,从而影响后续入射电子束的能量及次级电子的运动轨迹。王丹等^[34]详细研究了在介质表面初始不带电、初始带正电和初始带负电的条件下,分别以单一能量电子束入射和以连续能量电子束入射介质表面时,表面电位对于介质表面二次电子发射的影响规律。此外, Renoud R 等针对电子持续照射下介质材料的二次电子发射特性进行了 MC 模拟^[35]。当入射电子能量较高时,如图 3(a)所示,介质材料表面呈现带负电的特性,随着电子入射过程的持续,二次电子发射系数(Secondary Electron Yield, SEY)从初始小于 1 的状态逐渐增大至 1 并达到稳定;当入射电子能量较低时,如图 3(b)所示,介质材料表面呈现带正电的特性,对应的 SEY 则从大于 1 的初始状态逐渐减小到 1 并达到稳定。封国宝等^[36]对电子辐照介质样品后电荷的弛豫泄放过程进行了数值模拟研究,图 4 为 3 种不同电子迁移率($\mu_e=10^{-11}, 10^{-10}$ 和 $10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)的样品达到带电饱和并停止照射后的泄放暂态过程。在电子迁移率相对较大时,泄漏电流在泄放阶段从较高的饱和值迅速下降为零;当电子迁移率较小时,电荷的泄放过程将逐渐放缓。因此要避免带电的影响,可以采用电子迁移率更大的材料或采用金属掺杂的电介质材料来达到削弱介质带电的目的。

1.2 实验研究

西北核技术研究所与西安电子科技大学联合设计了一种组合型 X 波段 HPM 喇叭馈源介质输出窗击穿实验装置^[37],该装置主要由 HPM 源、模式转换器、变张角喇叭、介质输出窗等组成,通过调节变张角喇叭口面与输出窗之间的距离 d ,实现介质输出窗内表面电场强度的调节,从而获得输出窗内表面的 HPM 击穿特性,实验装置原理如图 5 所示。在文献[37]中实验装置的基础上,秋实等^[38]研制了一套光谱探测系统,该系统包括紫外成像探测器和 X 射线成像探测器两个工作单元,利用该光谱探测系统,可对聚四氟乙烯介质窗受 HPM 源的作用而发生击穿时的实验环境中的紫外线和 X 射线进行初步诊断。

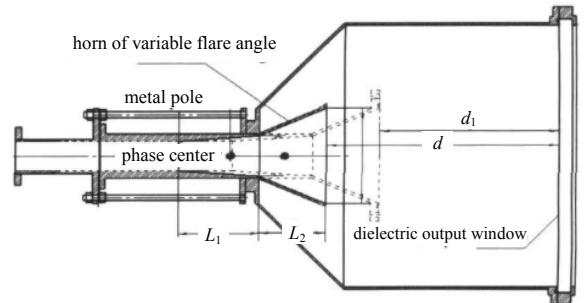


Fig.5 Structure of experiment device
图 5 实验装置结构图

美国麻省理工学院的 R J Temkin 团队在 2019 年首先针对太赫兹频段的介质表面次级电子倍增放电阈值与频率的关系展开了研究^[39]。利用前期研制的工作频率为 110 GHz 的回旋管作太赫兹辐射源,构造了一个类射频窗的高斯模式腔体,从而实现了 110 GHz 下类射频窗中介质片表面的次级电子倍增的研究。实验模拟了 E_{\parallel} 和 E_{\perp} 两种入射射频场结构,所用介质材料包括氧化铝、蓝宝石、熔融石英和晶体石英,实验装置示意图如图 6 所示。图 7 为熔融石英和氧化铝材料的次级电子倍增发生时刻的射频电场强度 E_{MT} 与频率的关系图。由于测量方法的差异,9.4 GHz 熔融石英的数据点是其微放电阈值的一个上限,与图中的虚线有一定偏离。虽然该研究为太赫兹频段下介质微放电阈值与频率的关系提供了一定的实验结果,但未来仍需对太赫兹频段下介质窗次级电子倍增效应这一研究领域进行更为深入的实验和理论研究,才能获得更全面的认识。

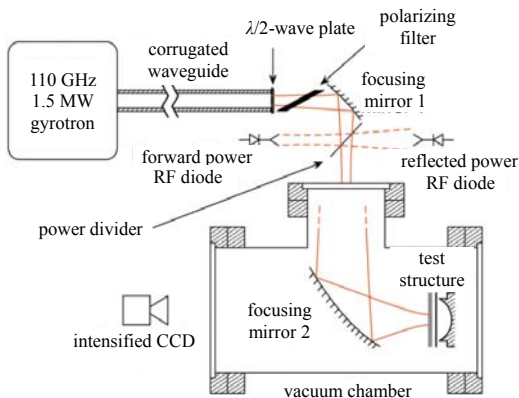


Fig.6 Simplified schematic of the experimental setup for studying dielectric multipactor at 110 GHz
图 6 110 GHz 下介质微放电实验装置的简化示意图

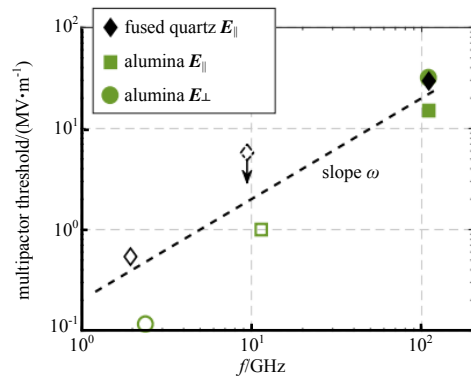


Fig.7 Dielectric multipactor thresholds at frequencies from 2 to 11 GHz compared with the data at 110 GHz
图 7 2~11 GHz 频率下的电介质微放电阈值与 110 GHz 的电介质微放电阈值比较结果

2 次级电子倍增抑制方法研究

2.1 镀膜抑制次级电子倍增的方法

由于次级电子倍增是一种表面效应且部分材料自身具有较低的 SEY，因此若利用镀膜工艺将这类低 SEY 材料以薄膜的形式覆盖在其他高 SEY 的固体材料表面，应能有效降低原始固体材料表面的 SEY。TiN 薄膜是目前应用较广的低 SEY 镀膜材料^[40-42]，早在 1989 年，Saito 等^[43]已采用磁控溅射法在高纯陶瓷窗表面覆盖 0.5~1.5 nm 厚的 TiN 镀层，从而将陶瓷窗的击穿阈值提高。暴露在大气中的薄膜会受到表面吸附、玷污、氧化等因素的影响，其表面稳定性也会受到不同程度的影响进而对薄膜的二次电子发射特性造成一定影响，因此镀膜材料的稳定性也一直被研究者所关注。2007 年，Ana Ruiz 等^[41]研究了 TiN 薄膜表面 SEY 随时间变化的关系，结果表明：TiN 薄膜表面 SEY 随放置时间的增加而逐渐增大，当放置时间达到 59 天时，薄膜表面的 SEY 趋于稳定。该研究结果证明了 TiN 在大气环境中具有较好的稳定性，为 TiN 薄膜的进一步应用提供了理论支撑。张雪团队还讨论了镀膜以及传输功率大小对陶瓷窗片表面次级电子倍增活跃区域的影响^[44]：在低传输功率下，次级电子仅在未镀膜的窗片表面被激励，并以双面倍增的方式在金属法兰与镀膜窗片相对应的区域增长；在较高的传输功率下，窗片表面的次级电子将以单面倍增的方式活跃在窗片表面与波导口相对的区域。

2.2 周期性表面抑制次级电子倍增

A Neuber 等^[45]在实验中发现表面矩形槽能够阻断电子倍增过程，提高闪络场强，可将击穿阈值提高 40% 以上。常超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表面次级电子倍增的方法^[46-50]，并在 X 和 C 两个波段针对周期性表面提高介质窗微波击穿阈值进行了实验验证^[47]，实验结果均表明周期性表面对次级电子倍增具有显著的抑制作用，介质窗的微波击穿阈值得到了有效提高。董焯等^[51]通过 PIC 仿真，研究了刻槽参数，即槽高和槽深对次级电子倍增的抑制规律，得出增加槽深、缩短槽宽可以有效抑制次级电子倍增的结论。程国新等^[52-54]也证实了周期性表面通过有效改变击穿通道，从而显著提高击穿阈值且几乎不影响微波辐射场的远场分布。文献^[55]建立了动力学模型，对不同微波电场和表面静电场条件下槽内电子运动轨迹进行了仿真分析。仿真结果表明，当电子在槽底部，倍增过程中碰撞到槽壁时，由于受到槽壁的限制，倍增过程会被打断进而抑制闪络现象的发生。

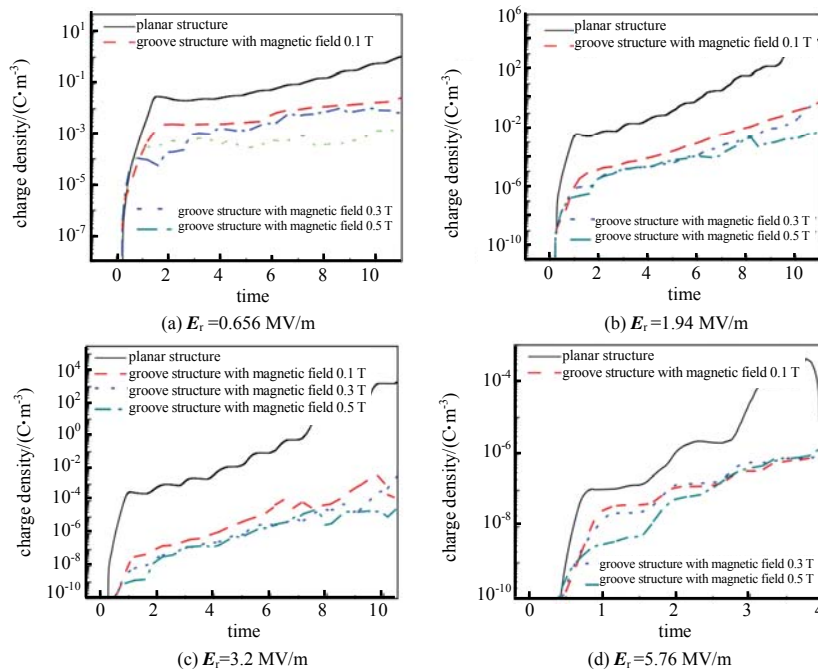


Fig.8 Comparison of the structures of plate and groove under different electric field strengths

图 8 平板与刻槽且加磁场在不同场强条件下的结果对比

2.3 外施磁场抑制次级电子倍增

外施磁场也被认为是抑制介质表面次级电子倍增的有效手段之一。2011 年常超团队^[56]提出了施加纵向磁场

的方法来抑制介质加速器结构内的次级电子倍增效应；蔡利兵等通过施加与微波电场垂直的外磁场实现了介质表面次级电子倍增的抑制。这是由于在这样的电磁场条件下，电子做回旋漂移运动的过程中，其中半个微波周期电子被推离介质表面，另外半个微波周期又被拉回介质表面造成的。推离介质表面的过程不发生次级电子倍增，而拉回介质表面时降低电子碰撞能量，从而实现次级电子倍增效应的抑制^[57]。董焯等^[58]利用自编 1D3V PIC 程序，通过对次级电子数目、平均能量、密度、运动轨迹、渡越时间、介质表面静电场及沉积功率等物理量时空分布关系的对比分析，得到了轴向与横向两种不同形式的外施磁场对次级电子倍增抑制的作用机理。由于外施磁场不能抑制与其平行的轴向电场和与其垂直的径向电场同时作用所带来的电子倍增，因此在前期研究基础上，李爽等^[59]提出采用表面刻槽结构并结合外施磁场的方法抑制电磁场横磁(TM)模式下介质表面的次级电子倍增，并在均匀介质加载 TM_{01} 模式、微波频率 $f=11.42$ GHz 的圆波导内，通过宏粒子法对这一方法的效果进行了模拟。模拟结果如图 8 所示，结合刻槽技术后电子数密度大大下降，且随着场强的增大，该技术对电子数目剧增的抑制效果更好。同时采用周期性表面和施加磁场的方法，在各个场强条件下都能够有效降低电荷数目，对电子倍增起到较好的抑制效果，这一研究也为同时结合多种低 SEY 工艺进行微放电抑制提供了研究思路。

3 发展趋势

通过以上分析可以看出，国内外在真空电子器件输出窗的次级电子倍增效应这一研究领域已经开展了深入研究，取得了大量研究成果，为真空电子器件向更高功率等级发展提供了一定的理论指导。但随着真空电子器件向大功率、高频率方向发展，需进一步结合实际器件结构特性开展更为深入的研究，其发展趋势总结如下：

1) 以往有关低能电子对输出窗次级电子倍增效应影响的研究相对有限，而低能电子引起的次级电子倍增效应直接影响器件的性能，后续应针对低能电子引起的次级电子倍增效应展开实验和理论研究，开发低能电子入射介质窗片的 SEY 特性的测试方法，研究低能电子入射下介质窗片的次级电子倍增的动态特性，构建可监测高功率馈源输出窗介质窗片的二次电子发射系数、表面电荷量、静态电场的研究平台。

2) 由于基模及低阶模回旋器件的互作用结构尺寸越来越小，难以满足高频条件下高功率的要求，因此回旋器件开始利用高阶模来扩大互作用结构尺寸，实现高频率、高功率输出；此外，有些应用中要求最后输出高斯波束，相比低阶模回旋器件，高阶模回旋器件更易实现模式转换，因此高阶模回旋器件的应用越来越多。一方面工作模式阶数的增加会导致器件内部参与竞争的模式更密集，而且除了相同径向阶数的邻近模式之外，其他本征值更接近的反旋模式也将参与竞争^[18]；另一方面，高阶腔体的模式竞争问题会严重影响器件的稳定性，而且会导致杂谱和非相干电磁辐射的产生^[60]。这些均会进一步导致介质窗片处次级电子倍增效应发生机理更复杂，因此需开展高阶模式下介质窗片的次级电子倍增效应研究，构建工作模式与极化方式均可调的高功率微波介质窗击穿实验系统。

3) 目前所进行的介质窗次级电子倍增效应的理论研究还处在分米波和厘米波波段，对毫米波及太赫兹频段的研究甚少，因此针对未来毫米波和太赫兹频段的真空电子器件输出窗的次级电子倍增效应的动态演化过程、抑制方法的研究，是未来发展趋势之一。

4 结语

本文针对目前制约真空电子器件功率提升的输出窗次级电子倍增效应问题，系统梳理了国内外输出窗次级电子倍增效应的研究进展，总结了主要的抑制方法，在此基础上给出了未来真空电子器件输出窗次级电子倍增效应研究的发展趋势，以期对国内这一领域的研究推进提供参考。

参考文献：

- [1] 杨明,刘超,郑新. 大功率、高频段电真空器件在雷达技术领域的应用分析[J]. 现代雷达, 2017,39(4):83-86. (YANG Ming,LIU Chao,ZHENG Xin. A study on the application of high power and high frequency microwave vacuum devices in radar detection system[J]. Modern Radar, 2017,39(4):83-86.)
- [2] DAMMERTZ G,ALBERTI S,ARNOLD A,et al. Development of a 140 GHz 1 MW continuous wave gyrotron for the W7-X stellarator[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2002,30(3):808-818.
- [3] DENISOV G G,LTITVAK A G,MYASNIKOV V E,et al. Recent results of development in Russia of high power gyrotrons[C]// 2007 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu,Japan:IEEE, 2007:43-44.

- [4] CAUFFMAN S. Preliminary design of a 105–140 GHz step-tunable 1 MW gyrotron[C]// 2007 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu, Japan:IEEE, 2007:255–256.
- [5] ANDERSON J P, SHAPIRO M A, TEMKIN R J, et al. Studies of the 1.5 MW 110 GHz gyrotron experiment[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2004, 32(3):877–883.
- [6] KASUGAI A, KAJIWARA K, TAKAHASHI K, et al. Steady state operation of high power gyrotron for ITER[C] // 2007 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu, Japan:IEEE, 2007:37–38.
- [7] ROITMAN A, SWEENEY D, MATHIESON P, et al. Compact high power Ka-band extended interaction klystron for terrestrial and space applications[C]// 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA:IEEE, 2006:71–72.
- [8] 杜英华, 蔡军, 张小青, 等. 低电压高效率 W 波段脉冲行波管设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(4):726–729. (DU Yinghua, CAI Jun, ZHANG Xiaoqing, et al. Design of a low voltage high efficiency W-band pulsed Traveling Wave Tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(4):726–729.)
- [9] 安康, 刘本田, 张亦驰, 等. 140 GHz, TE_{22,6} 模式回旋振荡管高频谐振腔[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(1):18–23. (AN Kang, LIU Bentian, ZHANG Yichi, et al. The resonator in 140 GHz, TE_{22,6}-mode gyrotron oscillator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(1):18–23.)
- [10] 李思睿, 李天一, 陈辑, 等. E 波段折叠波导行波管集成极靴结构设计及仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(6):1025–1029. (LI Sirui, LI Tianyi, CHEN Ji, et al. Design and simulation of integrated pole piece structure for E-band Folded Waveguide TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(6):1025–1029.)
- [11] 何享斌, 杨金生, 万知之, 等. X 波段多注速调管双间隙输出腔设计和模拟[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(1):119–125. (HE Xiangbin, YANG Jinsheng, WAN Zhizhi, et al. Design and simulation of X-band high-power multi-beam klystron's double-gap coaxial output cavity[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(1):119–125.)
- [12] 李含雁, 白国栋, 李兴辉, 等. 采用 UV-LIGA 技术制作 340 GHz 折叠波导慢波结构[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(4):527–530. (LI Hanyan, BAI Guodong, LI Xinghui, et al. Microfabrication of 340 GHz Folded Waveguide Slow Wave Structure using UV-LIGA technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(4):527–530.)
- [13] 冯进军, 唐焯, 李含燕, 等. 340 GHz 太赫兹返波振荡器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1):32–37. (FENG Jinjun, TANG Ye, LI Hanyan, et al. 340 GHz terahertz Backward Wave Oscillators[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1):32–37.)
- [14] LIU S G, YUAN X S, FU W J, et al. The coaxial gyrotron with two electron beams I linear theory and nonlinear theory[J]. Physics of Plasmas, 2007, 14(10):103113-1–103113-7.
- [15] LIU Yinghui, LEI Chaojun, NIU Xinjian, et al. Study and design of cavity and MIG of a high power 140 GHz gyrotron at UESTC[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(3):033106-1–033106-7.
- [16] LIU Yinghui, LIU Qiao, NIU Xinjian, et al. Analysis and design of the resonator in a 110 GHz gyrotron oscillator[J]. Journal of Fusion Energy, 2015, 34(3):456–462.
- [17] LIU Qiao, LIU Yinghui, CHEN Zhaowei, et al. Investigation on heat transfer analysis and its effect on a multi-mode, beam-wave interaction for a 140 GHz, MW-class gyrotron[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(4):043101-1–043101-7.
- [18] 马国武. 140 GHz 回旋管理论与实验研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2019. (MA Guowu. Theoretical and experimental research on 140 GHz gyrotron[D]. Mianyang, Sichuan, China:China Academy of Engineering Physics, 2019.)
- [19] 程国新. 高功率微波输出窗真空-介质界面击穿研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008. (CHENG Guoxin. High power microwave surface flashover on the vacuum side of RF dielectric window[D]. Changsha, China:National University of Defense Technology, 2008.)
- [20] 常超. 高功率微波等离子体放电研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(14):1391–1403. (CHANG Chao. High power microwave plasma discharge[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(14):1391–1403.)
- [21] 钟哲夫, 李浩. 高功率微波输出窗的介质物理光学分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8):1341–1344. (ZHONG Zhefu, LI Hao. Dielectric physic-optics method for analysis of high power microwave output window[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8):1341–1344.)
- [22] KISHEK R A, LAU Y Y. Interaction of multipactor discharge and RF circuits[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6):1218–1222.
- [23] KISHEK R A, LAU Y Y. Multipactor discharge on a dielectric[J]. Physical Review Letters, 1998, 80(1):193–196.

- [24] KIM H C, VERBONCOEUR J P. Time-dependent physics of a single-surface multipactor discharge[J]. *Physics of Plasmas*, 2005,12(12):123504.
- [25] 左春彦,高飞,戴忠玲,等. 高功率微波输出窗内侧击穿动力学的 PIC/MCC 模拟研究[J]. *物理学报*, 2018,67(22):332-342. (ZUO Chunyan,GAO Fei,DAI Zhongling,et al. PIC/MCC simulation of breakdown dynamics inside high power microwave output window[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018,67(22):332-342.)
- [26] 郝西伟,张冠军,黄文华,等. 高功率微波作用下介质窗表面电子运动 2 维仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2010,22(1):99-104. (HAO Xiwei,ZHANG Guanjun,HUANG Wenhua,et al. 2D simulation of electron movement on dielectric window surface under high power microwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010,22(1):99-104.)
- [27] KIM H C, VERBONCOEUR J P, LAU Y Y. Modeling RF window breakdown: from vacuum multipactor to RF plasma[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007,14(4):766-772.
- [28] 范壮壮,王洪广,林舒,等. 高功率微波介质窗表面电子倍增二维粒子模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2014,26(6):57-60. (FAN Zhuangzhuang,WANG Hongguang,LIN Shu,et al. Two dimensional particle-in-cell simulation of electron multipactor on high power microwave dielectric window surface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014,26(6):57-60.)
- [29] 张雪,王勇,范俊杰,等. 圆窗片表面次级电子倍增效应的数值模拟[J]. *物理学报*, 2014,63(22):349-356. (ZHANG Xue,WANG Yong,FAN Junjie,et al. Numerical simulation of multipactor phenomenon on the surface of cylinder window disk[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014,63(22):349-356.)
- [30] 张雪,王勇,朱方,等. TM_{11} 模对高功率盒形窗次级电子倍增效应影响的研究[J]. *真空电子技术*, 2014(4):19-23. (ZHANG Xue,WANG Yong,ZHU Fang,et al. The effect of TM_{11} mode on HPM pill-box window multipactor[J]. *Vacuum Electronics*, 2014(4):19-23.)
- [31] 张雪,王勇,徐强. 双面次级电子倍增效应向单面次级电子倍增效应发展规律的研究[J]. *物理学报*, 2015,64(20):407-414. (ZHANG Xue,WANG Yong,XU Qiang. Research on the development mechanism: from two-side multipactor to one-side multipactor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015,64(20):407-414.)
- [32] 张雪,王滔,倪鑫荣,等. 低能二次电子对微波输能窗击穿现象的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2020,32(10):54-59. (ZHANG Xue,WANG Tao,NI Xinrong,et al. Effects of low energy secondary electrons on breakdown of dielectric window[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020,32(10):54-59.)
- [33] ZHANG Xue,TANG Haobei,CHEN Xuyuan,et al. Multipactor discharge in circular waveguide window[J]. *Physics of Plasmas*, 2020,27(4):043504-1-043504-9.
- [34] 王丹,贺永宁,李韵. 电子束撞击介质表面引发的带电现象分析[J]. *中国空间科学技术*, 2017,37(2):1-10. (WANG Dan,HE Yongning,LI Yun. Surface charging analysis induced by electron beam impact dielectric[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2017,37(2):1-10.)
- [35] RENOUD R,MADY F,ATTARD C,et al. Secondary electron emission of an insulating target induced by a well-focused electron beam—Monte Carlo simulation study[J]. *Physica Status Solidi A*, 2004,201(9):2119-2133.
- [36] 封国宝,曹猛,崔万照,等. 电子辐照电介质样品带电泄放弛豫特性研究[J]. *物理学报*, 2017,66(6):290-301. (FENG Guobao,CAO Meng,CUI Wanzhao,et al. Transient characteristics of discharge of polymer sample after electron-beam irradiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017,66(6):290-301.)
- [37] 张治强,秋实,方进勇,等. X 波段馈源输出窗高功率微波击穿实验装置[J]. *强激光与粒子束*, 2010,22(7):1595-1598. (ZHANG Zhiqiang,QIU Shi,FANG Jinyong,et al. Experiment device for X-band HPM feed output window dielectric breakdown[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010,22(7):1595-1598.)
- [38] 秋实,刘国治,张治强,等. 高功率微波介质击穿中 X 射线和紫外线的初步诊断[J]. *强激光与粒子束*, 2011,23(7):1913-1916. (QIU Shi,LIU Guozhi,ZHANG Zhiqiang,et al. X-ray and ultraviolet ray diagnosis of high power microwave dielectric breakdown[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011,23(7):1913-1916.)
- [39] SCHAUB S C,SHAPIRO M A,TEMKIN R J. Measurement of dielectric multipactor thresholds at 110 GHz[J]. *Physical Review Letters*. 2019,123(17):175001.
- [40] MICHIZONO S,KINBARA A,SAITO Y,et al. TiN film coatings on alumina radio frequency windows[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1992,10(4):1180-1184.
- [41] RUIZ A,ROMÁN E,LOZANO P,et al. UHV reactive evaporation growth of titanium nitride thin films, looking for multipactor effect suppression in space applications[J]. *Vacuum*, 2007,81(11-12):1493-1497.
- [42] ORLOV O S,MESHKOV I N,RUDAKOV A Y,et al. Secondary electron yield from stainless steel surface coated with titanium nitride[J]. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2014,11(5):632-635.

- [43] SAITO Y, MATUDA N, ANAMI S, et al. Breakdown of alumina RF windows[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989,24(6):1029–1032.
- [44] 张雪,徐强,王勇,等. 高功率盒形窗内次级电子倍增效应[J]. 强激光与粒子束, 2016,28(2):82–87. (ZHANG Xue, XU Qiang, WANG Yong, et al. Multipactor phenomenon of high-power pill-box window[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016,28(2):82–87.)
- [45] NEUBER A A, EDMISTON G F, KRILE J T, et al. Interface breakdown during high-power microwave transmission[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007,43(1):496–500.
- [46] CHANG C, LIU G Z, HUANG H J, et al. Suppressing high-power microwave dielectric multipactor by the sawtooth surface[J]. Physics of Plasmas, 2009,16(8):083501.
- [47] CHANG C, LIU G Z, FANG J Y, et al. Field distribution, HPM multipactor and plasma discharge on the periodic triangular surface[J]. Laser and Particle Beams, 2010,28(1):185–193.
- [48] CHANG C, LIU G Z, TANG C X, et al. Review of recent theories and experiments for improving high-power microwave window breakdown thresholds[J]. Physics of Plasmas, 2011,18(5):055702.
- [49] CHANG C, LIU G Z, HUANG H J, et al. The effect of grooved surface on dielectric multipactor[J]. Journal of Applied Physics, 2009,105(12):174–184.
- [50] LI S, CHANG C, WANG J G, et al. Tracking multiple generation and suppression of secondary electrons on periodic triangular surface[J]. Physics of Plasmas, 2013,20(12):1172–1180.
- [51] 董焯,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[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(2):399–406. (DONG Ye, DONG Zhiwei, YANG Wenyuan, et al. Monte Carlo simulation of multipactor discharge suppressing on grooved dielectric surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(2):399–406.)
- [52] CHENG G X, CAI D, HONG Z Q. Variation in time lags of vacuum surface flashover utilizing a periodically grooved dielectric[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013,20(5):1942–1950.
- [53] 张慧博,杨建华,程国新,等. 刻槽结构高功率微波输出窗次级电子倍增效应[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(5):1189–1194. (ZHANG Huiibo, YANG Jianhua, CHENG Guoxin, et al. The secondary electron multiplier effect of high-power microwave output window of groove structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(5):1189–1194.)
- [54] 程国新,程新兵,杨杰,等. 刻槽绝缘子真空表面闪络光学特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(5):1205–1210. (CHENG Guoxin, CHENG Xinbing, YANG Jie, et al. The optical characteristics of the vacuum surface flashover of the groove insulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(5):1205–1210.)
- [55] 宋佰鹏,范壮壮,苏国强,等. 高功率微波介质窗表面矩形槽抑制二次电子倍增[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(6):1189–1194. (SONG Baipeng, FAN Zhuangzhuang, SU Guoqiang, et al. Rectangular grooves suppressing multipactor across high power microwave dielectric window[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(6):1189–1194.)
- [56] CHANG Chao, VERBONCOEUR John, TANTAWI Sami, et al. The effects of magnetic field on single-surface resonant multipactor[J]. Journal of Applied Physics, 2011,110(6):063304.
- [57] CAI L B, WANG J G, ZHU X Q, et al. Suppression of multipactor discharge on a dielectric surface by an external magnetic field[J]. Physics of Plasmas, 2011,18(7):073504.
- [58] 董焯,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[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(10):2653–2658. (DONG Ye, DONG Zhiwei, ZHOU Qianhong, et al. Multipactor discharge suppression on dielectric surface by two patterns of external magnetic fields[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(10):2653–2658.)
- [59] 李爽,常超,王建国,等. 横磁模下介质表面二次电子倍增的抑制[J]. 物理学报, 2015,64(13):388–395. (LI Shuang, CHANG Chao, WANG Jianguo, et al. Suppression of secondary electron multipactor on dielectric surface in TM mode[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(13):388–395.)
- [60] 杜朝海,罗里,刘濮鲲. 毫米波–太赫兹电子回旋器件的几个基础问题[J]. 北京航空航天大学学报, 2015,41(10):1880–1886. (DU Chaohai, LUO Li, LIU Pukun. Several fundamental challenges of millimeter-to-terahertz electron cyclotron devices[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015,41(10):1880–1886.)

作者简介:

张雨婷(1990–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为空间微波新技术. email:yuting6692@126.com.

崔万照(1975–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为空间大功率微波技术.