

# 磁绝缘线振荡器阴极烧蚀与电压波形的关系研究

陈代兵<sup>†</sup> 张运俭 张北镇 王冬 秦奋 文杰 金晓 吴勇 于爱民

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

(2012年3月6日收到; 2012年7月17日收到修改稿)

通过粒子模拟和实验研究相结合的方法, 研究了磁绝缘线振荡器的阴极烧蚀与输入电压波形的关系, 找到了造成阴极烧蚀的根本原因, 给出了电子束回轰阴极的清晰图像, 并通过对低阻抗加速器平台输出电压波形的调整, 抑制了反向电压, 解决了器件的阴极烧蚀问题. 研究表明: 在正向电压作用下已经发射出来的电子束在超过一定幅度的反向电压作用下发生反向运动并回轰阴极, 产生反向电流并造成器件阴极的烧蚀, 因此注入电压下降沿之后的反向电压是引起磁绝缘线振荡器的阴极烧蚀的最根本因素.

**关键词:** 磁绝缘线振荡器, 高功率微波, 阴极烧蚀, 反向电压

**PACS:** 29.90.+r, 41.20.-q, 02.60.-x, 07.57.Hm

**DOI:** 10.7498/aps.62.012901

## 1 引言

目前, 磁绝缘线振荡器 (MILO)<sup>[1-10]</sup> 的阴极发射材料主要为天鹅绒, 因此天鹅绒阴极的烧蚀是一个容易出现的现象, 值得仔细研究. 但是针对 MILO 器件阴极烧蚀原因分析的报道还很少见. 为了解决输出电压脉宽小于 200 ns 的低阻抗加速器烧蚀 MILO 器件阴极的问题, 我们开展了大量研究.

在排除了由于阴、阳极间同心度太差或者存在多余尖端从而导致了阴极表面局部场强急剧增强产生过度发射而烧蚀 MILO 器件阴极的情况外, 根据查阅文献 [10—13], 基于等离子体闭合和 MILO 器件不起振的情况, 最初认为 MILO 器件的阴极烧蚀原因主要是由于电压脉冲过宽导致阴阳极间等离子体闭合, 阳极等离子体轰击阴极从而烧蚀阴极; 或者是由于注入电压的前沿太长或者电压幅值太低, 使得器件迟迟不能达到或者达不到自磁绝缘从而烧蚀阴极.

根据文献 [12], 阴极等离子体的扩散速度约为 2 cm/ $\mu$ s, 而我们研究的 L 波段阶梯阴极型 MILO 的阴、阳极间的最近距离为 2 cm, 因此, 即使完全无磁绝缘的作用, 能够造成等离子体闭合的脉冲宽度也是为微妙量级, 远远大于目前电压脉宽为 200 ns

的量级. 因此, 电压脉冲宽度 (小于 200 ns) 不是造成低阻抗加速器烧蚀 MILO 阴极的原因. 同样, 由于目前电压上升沿为 30 ns 左右, 该宽度远远小于等离子体闭合的脉冲宽度. 因此, 注入电压的前沿太长或者电压幅值太低都不是造成低阻抗加速器烧蚀 MILO 阴极的原因. 另外, 对于器件不绝缘的情况, 选取了 MILO 器件无收集极和 MILO 器件无扼流片两种情况进行了数值模拟和实验研究, 结果表明这两种情况下都不易造成阴极烧蚀.

因此我们认为注入电压下降沿之后的反向电压是引起 MILO 器件阴极烧蚀的最主要因素, 因为其可以导致反向电流, 即已经发射出来的电子回轰阴极, 从而烧蚀阴极. 当然, 由于器件输出部分的功率容量不足引起的骤然强烈反射也会导致束-波相互作用紊乱, 也是导致阴极烧蚀的一个原因.

## 2 数值模拟研究

L 波段阶梯阴极型 MILO 的结构如图 1 所示. 由于采用实际实验电压波形时, 脉宽较宽, 需要计算的时间太长, 所以计算量、数据存储量巨大. 因此, 本文的数值计算采用与实验波形相似的理想电压波形. 如图 2 所示, 电压幅度约 760 kV, 在电压下降沿之后设置 30% 的反向电压, 电压上升沿 1 ns, 平

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: renture@sina.com.cn

顶 10 ns, 电压下降沿起点为 10 ns, 过零点为 11 ns, 反向最大点 12 ns, 反向平顶 2 ns. 由此可以得到器件二极管的电流, 如图 3 所示, 电流幅度约 61 kA, 在电流的下降沿之后则产生了 10% 的反向电流.

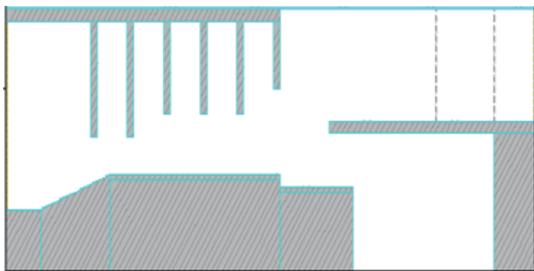


图 1 L 波段阶梯阴极型 MILO 的模拟结构示意图

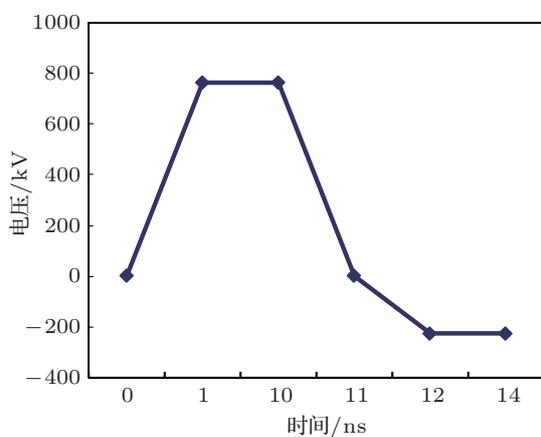


图 2 注入电压波形

分析 MILO 器件的粒子模拟过程的电子相空图可以看出在反向电压作用的时间段内在轴向的 2 个位置存在电子的明显回轰现象, 如图 4 所示: 1) 在电压下降沿的电压过零点与反向电压最大值之间 (11.7—12.1 ns), 在第二个谐振腔对应位置, 存在电子束向阴极运动, 最后这部分电子轰击阴极后消失; 2) 在反向电压作用阶段 (13.2—13.7 ns), 在阴极的末端位置, 存在电子束向阴极运动, 最后这些电子轰击阴极后消失. 对应于电子对阴极的回轰现象产生了反向电流, 本例中的反向电流仅为 10%, 可以预计, 随着反向电流的增大, 回轰更加剧烈, 因此导致阴极烧蚀现象会更严重.

产生该现象的原因在于电压波是从左至右注入, 受到电压变化的影响也是从左至右; MILO 器件的扼流片位置处的阴阳极间的距离最近, 相对场强最强, 紧邻扼流片的第二个谐振腔附近的电子在正

向电压作用下已经被发射出来, 并在电磁场作用下向右运动, 甚至已经形成了轮辐, 此时在反向电压作用下, 电子被减速前行, 在第二个谐振腔附近的电子减速最多, 在超过一定的反向电压幅度下, 电子产生反向运动, 形成反向电流并最终向阴极回轰, 因此, 最早出现阴极回轰现象的区域是在第二个谐振腔附近; 而在阴极末端, 阴极与收集极之间的阴阳极间距仅次于扼流片之间的阴阳极间距, 此处的电子在正向电压作用下已经被发射出来并在电磁场作用下向右运动, 此时在反向电压作用下, 电子被减速前行, 在超过一定的反向电压幅度下, 电子产生反向运动, 形成反向电流并最终向阴极回轰, 因此, 阴极末端是出现电子回轰阴极现象的第二个区域. 当然, 随着反向电压幅度进一步增大, 出现电子回轰阴极现象的区域主要以这两个区域为中心会进一步增大. 需要说明的是由于 MILO 器件的具体结构变化, 出现电子回轰阴极现象的具体区域可能与本文有差别.

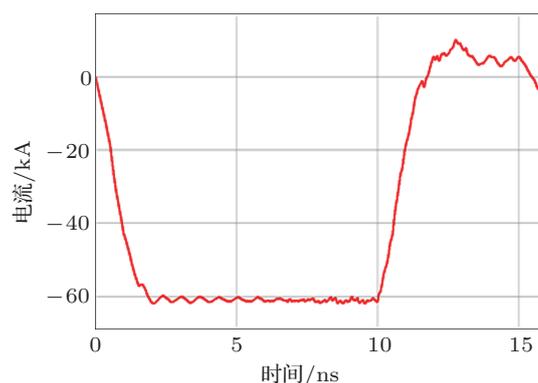


图 3 电流波形

### 3 实验研究

通过调节加速器的输出回路参数, 逐渐降低反向电压 (电流) 的幅度, 观察阴极的烧蚀位置和烧蚀程度. 连接 MILO 器件后, 加速器上最初的典型二极管电压、电流波形如图 5 所示, 二极管电压约 700 kV, 反向电压约 350 kV, 电流约 70 kA, 反向电流约 32 kA. 实验结果表明: 经过一发实验后阴极对应第二个谐振腔附近和阴极末端的烧蚀现象十分严重 (如图 6 所示), 阴极上的天鹅绒烧蚀成白色粉末, 局部已经脱落, 并具有一定的对称性, 可以排除结构不对称引起的烧蚀现象, 这与数值模拟的研究结果符合.

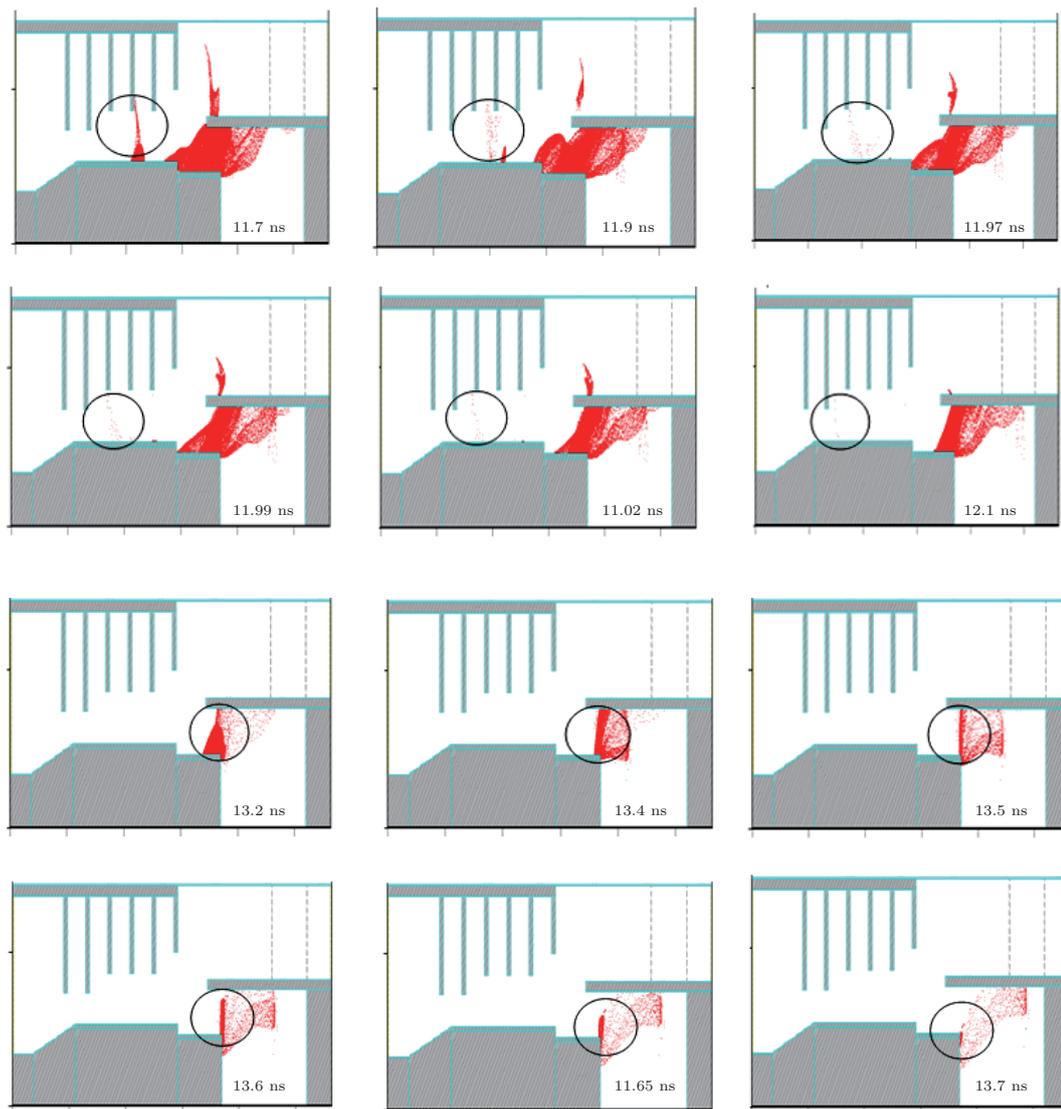


图4 纵截面上电子回轰阴极的轨迹图

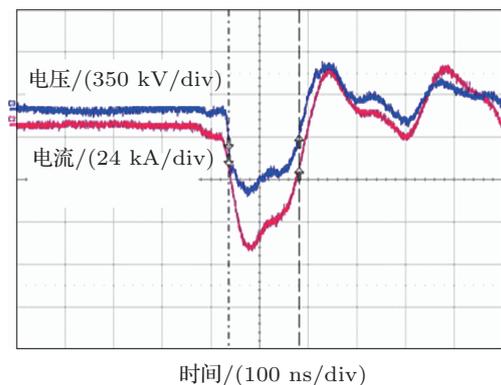


图5 导致阴极烧蚀的典型实验波形

随着对加速器回路参数的调整与适应性改造, 二极管电压的反向电压逐渐得到了抑制, 二极管电流的反向电流也逐渐得到了抑制, 相应地, 在相当

的电压幅度条件下, 阴极的烧蚀程度逐渐降低, 烧蚀区域也逐渐缩小, 这与数值模拟研究的结果比较符合. 经过调整后的二极管电压电流的典型波形如图7所示, 可以看出, 二极管电压还存在一定的反向电压, 但是幅度较低, 因此没有产生电流反向, 消除了二极管电流的反向电流. 实验结果表明在这样的电压波形条件下, 几乎无阴极烧蚀现象.



图6 阴极烧蚀后的照片

以上可以看出,注入电压决定了二极管电流,导致 MILO 器件阴极烧蚀的原因是反向电压产生了二极管的反向(传导)电流,该电流是由于反向电压的作用,而使得在正向电压作用下由阴极发射出来的电子束减速并反向运动直至轰击阴极而形成.因此可以判断,只要存在二极管的反向电流,就存在电子对阴极的回轰现象.轻微的回轰现象不会造成阴极烧蚀,只有当回轰达到一定程度时才会烧蚀阴极.该轰击现象与电子束轰击电子收集极而可能造成不锈钢收集极产生坑洼的现象相似.而即使在注入电压的下降沿存在一定的反向电压,只要幅度不够大,不会产生较大的反向电流,也不会产生阴极烧蚀现象.另外需要指出,虽然二极管电压存在较大的反向电压,但是只要反向电压所处的位置不紧随在正向电压之后,其不会产生反向传导电流,都不易造成阴极烧蚀.

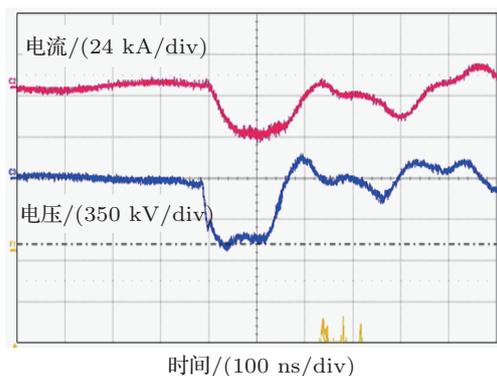


图7 加速器调整后的典型实验波形

同时可以看出,对于有磁场高功率微波(HPM)

器件,由于较强磁场的引导和约束,反向电压不易造成电子束的反向.即使反向,电子束也难以回轰到阴极,因此不易造成阴极烧蚀现象.而对于 MILO 等无磁场 HPM 器件,在注入电压下降沿之后的反向电压是造成 MILO 器件阴极烧蚀的最主要因素.所以为了解决阴极烧蚀问题,确保无磁场器件正常工作,需要抑制注入电压下降沿之后的反向电压.需要强调指出:不是所有的反向电压都会造成电子束回轰阴极,而是紧随在能够产生电子发射的正向电压之后的反向电压才容易造成电子束回轰阴极.

## 4 结论

本文采用数值模拟与实验相结合的方法,针对在低阻抗加速器平台上调试 MILO 器件导致阴极烧蚀的问题,开展了 MILO 器件的输入电压波形与阴极烧蚀的关系研究,从理论和实验上找到了造成阴极烧蚀的根本原因,给出了电子束回轰阴极的清晰图像,并通过输入电压波形的调整,解决了低阻抗加速器平台烧蚀阴极而不能用于器件调试的问题,为 MILO 器件的调试提供了基本的实验条件.进而还提出了无磁场 HPM 器件对输入电压在反向电压方面的波形要求.

研究表明,注入电压下降沿之后的反向电压是引起 MILO 器件阴极烧蚀的最根本因素,原因是超过一定幅度的反向电压可以导致反向电流,即已经发射出来的电子束发生反向运动并回轰阴极造成阴极烧蚀.

- [1] Lemke R W, Clark M C 1987 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **62** 3436
- [2] Clark M C, Marder B M, Bacon L D 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 78
- [3] Chen D B, Fan Z K, Dong Z W, Xu Z, Zhou H J, Guo Y H, He H, Gong H T, An H S 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 820 (in Chinese) [陈代兵, 范植开, 董志伟, 许州, 周海京, 郭焱华, 何琥, 龚海涛, 安海狮 2007 强激光与粒子束 **19** 820]
- [4] Chen D B, Fan Z K, Zhou H J, Gao F Q, He H, Guo Y H, Wang D, Wang X D, Gong H T, An H S 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1352 (in Chinese) [陈代兵, 范植开, 周海京, 高凤琴, 何琥, 郭焱华, 王冬, 王晓东, 龚海涛, 安海狮 2007 强激光与粒子束 **19** 1352]
- [5] Chen D B, Wang D, Meng F B, Fan Z K 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 23
- [6] Chen D B, Wang D, Meng F B, Fan Z K, Qin F, Wen J 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 1916
- [7] Chen D B, Wang D, Fan Z K, Meng F B, An H S, Gong H T, Qin F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4548 (in Chinese) [陈代兵, 王冬, 范植开, 孟凡宝, 安海狮, 龚海涛, 秦奋 2009 物理学报 **58** 4548]
- [8] Chen D B, Wang D, Qin F, Wen J, Jin X, An H S, Zhang X K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 012901 (in Chinese) [陈代兵, 王冬, 秦奋, 文杰, 金晓, 安海狮, 张新凯 2012 物理学报 **61** 012901]
- [9] Wang D, Chen D B, Fan Z K, Deng J K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4875 (in Chinese) [王冬, 陈代兵, 范植开, 邓景康 2008 物理学报 **57** 4875]
- [10] Fan Y W, Zhou H, Zhong H H, Su T, Ji T, Yang H W, Luo L 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 587 (in Chinese) [樊玉伟, 周恒, 钟辉煌, 舒挺, 季涛, 杨汉武, 罗玲 2010 强激光与粒子束 **22** 587]
- [11] Gong Y B, Zhang Z, Wei Y Y, Meng F B, Fan Z K, Wang W X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3990 (in Chinese) [宫玉彬, 张章, 魏彦玉, 孟凡宝, 范植开, 王文祥 2004 物理学报 **53** 3990]
- [12] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E 2007 *High Power Microwave* (2nd Ed.) Taylor & Francis Group
- [13] Zhou C M, Liu G Z, Liu Y G 2007 *High Power Microwave Source* (Beijing: Atomic Energy Press) (in Chinese) [周传明, 刘国治, 刘永贵 2007 高功率微波源 (北京: 原子能出版社)]

# Relation analysis between cathode ablation and voltage for a magnetically insulated transmission line oscillator

Chen Dai-Bing<sup>†</sup> Zhang Yun-Jian Zhang Bei-Zheng Wang Dong  
Qin Fen Wen Jie Jin Xiao Wu Yong Yu Ai-Ming

(*Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 6 March 2012; revised manuscript received 17 July 2012)

## Abstract

Through the particle-in-cell simulation and experimental investigation, the relation between the cathode ablation and the input voltage waveform of a magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) is analyzed. And the key factor that results in the cathode ablation is found. The figures and process that the electron beam bombards back the cathode are obviously presented. By waveform adjustment of the low impedance accelerator, the reverse voltage of the input voltage to MILO is restrained, and the cathode ablation problem of the MILO driven by the low impedance accelerator is solved. Analysis results show that the electron beam which has been hauled from the cathode by the right direction voltage moves back, which the reverse voltage with adequate amplitude driven, and the beam bombards back the the cathode. The reverse current is formed and the cathode of the MILO device is ablated. Therefore, the reverse voltage immediately following the down slope of the input voltage is a key factor.

**Keywords:** magnetically insulated transmission line oscillator, high power microwave, cathode ablation, reverse voltage

**PACS:** 29.90.+r, 41.20.-q, 02.60.-x, 07.57.Hm

**DOI:** 10.7498/aps.62.012901

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: renture@sina.com.cn