

文章编号: 1001-4322(2003)12-1125-03

紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的粒子模拟*

樊玉伟^{1,2}, 舒挺¹, 李志强¹

(1. 国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 郑州防空兵学院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 采取减小阴极杆半径和长度、阴阳极间隙、叶片的长度和厚度及慢波结构周期的办法构造了一种紧凑型磁绝缘线性振荡器(MILO),并用 2.5 维全电磁 PIC 方法对这一器件进行了粒子模拟研究。该装置主频为 1.9 GHz,饱和后平均输出功率达 5.4 GW,束波转换效率达 12%。紧凑型 MILO 结构能避免电击穿,电子束发射的对称性较易控制。

关键词: 磁绝缘线振荡器; 慢波结构; 高功率微波; PIC 方法

中图分类号: TN753.4

文献标识码: A

磁绝缘线振荡器(MILO)是微波输出功率在 GW 量级的同轴正交场器件,是高功率微波研究领域的热点之一^[1~7]。MILO 器件的优点是其直流磁场由其内部电流提供,无需外加磁场,这一直流磁场起到阻止电子从阴极发射到阳极的作用。这种自绝缘机制可在一定程度上避免阴阳极之间的电击穿,使其能在数百 kV 外加电压下,输入几十 GW 的功率,并以 GW 量级输出^[1]。但 L 波段 MILO 存在着结构较大,器件运行的技术可行性(主要是电子束对称发射的控制)较差的缺点;同时,MILO 还存在着容易发生电场击穿问题。本文对文献[1]中的 MILO 结构进行了改进,克服了以上的缺点,构造了一种紧凑型 MILO。

1 基本原理

MILO 产生高功率微波的物理机制是^[6]:在输入端加上适当的输入电压(一般为几百 kV),电子从阴极侧面发射。最右侧发射出来的电子由收集极回收,这部分电子束流称为负载电流,其功能是产生一个环绕阴极杆的角向磁场,对阴极杆侧向发射电流起磁绝缘作用,因此又称为磁绝缘电流。阴极杆上游侧向发射的电子在阴阳极间的径向电场 E 和角向磁场 B 的共同作用下沿轴向右作 $E \times B$ 漂移,漂移过程中,电子束流与场相互作用。当这部分电子的漂移速度稍大于阳极慢波结构微波场的相速度时,电子的动能转换为场的能量,在适当的结构参数条件下将激励高功率微波。

2 结构改进

在保持叶片数目不变的条件下,减小慢波结构周期和阴极杆长度将缩短 MILO 的长度。慢波结构周期为叶片间距和叶片厚度之和。减小叶片间距将提高微波频率,所以,叶片间距的减小必须以微波频率不超出 L 波段为限。计算表明,叶片厚度对微波输出的功率和效率影响不大,只需保证叶片的机械强度。通常 0.30cm 的叶片厚度足以保证叶片的机械强度,故将叶片厚度从文献[1]中的 1.28cm 减至 0.30cm。同时,缩短阴极杆长度以适应新的慢波结构。于是,MILO 结构长度得到有效的减小。阴极杆长度的减小,使得电子发射面积减小,控制电子束的对称发射就相对容易些,这就提高了器件运行的技术可行性。

减小慢波叶片长度及阴阳极间隙可以减小 MILO 的半径。慢波叶片长度的减小将导致微波频率的提高,所以,慢波叶片长度的减小必须以微波频率不超出 L 波段为限。在保证入口处没有电击穿的情况下,还可以减小阴阳极间隙以减小 MILO 的半径。于是,MILO 结构的半径也得到适当的减小。

常见 MILO 器件的慢波结构前一部分大多是扼流片,以防止微波反射,达到提高微波输出功率和增大束波转换效率的作用。由于扼流片的内径要小于主慢波叶片(阳极慢波结构中间三个叶片)的内径,所以扼流片与阴极杆之间的场强要大于主慢波叶片与阴极杆之间的场强。当 MILO 工作时,就可能会在扼流片与阴极杆之间发生直流场强击穿而导致电子从此处逃逸,使得主慢波结构与阴极杆之间的相互作用电子减少,进而导致微波输出功率急剧下降甚至无微波输出。为解决这一问题,减小入口处阴极杆的半径,使得在 MILO 正常工作

* 收稿日期:2003-03-28; 修订日期:2003-07-07

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:樊玉伟(1972-),男,硕士研究生,从事高功率微波技术研究;E-mail:9108213@sohu.com。

电压下扼流片与阴极杆之间的直流场强小于直流场强的击穿域值。这一改进同时又减小了器件的重量,有利于器件的实用化。

按照上述思路,对文献[1]的 MILO 结构进行改进后的结构模型如图 1 所示,其结构比文献[1]的 MILO 结构更加紧凑。通过全电磁 PIC 方法粒子模拟对结构参数进行优化,优化后的结构参数和文献[1]相比较如下:结构总长由 100.00cm 缩短至 35.00cm;外筒半径由 14.30cm 减至 11.00cm;三组慢波叶片长由 6.70,5.70,5.40cm 分别减至 4.30,3.70,2.60cm;慢波结构周期由 3.84cm 减至 1.70cm;慢波叶片厚度由 1.28cm 减至 0.30cm。主慢波结构与阴极杆间的阴阳极间隙由 2.85cm 减至 1.50cm。

为了避免入口处可能发生的直流击穿,将入口处的阴极杆半径从文献[1]的 5.75cm 减至 4.5cm。阴极杆端头半径由文献[1]的 5.75cm 调整为 5.80cm。

3 典型模拟结果

利用上述模型,在工作电压为 550kV,二极管电流为 82kA 的条件下,可获得较强微波输出。主模频率为 1.9GHz;饱和后平均功率达 5.4GW,束波转换效率达 12%。图 2 给出的是典型的微波输出功率随时间的变化图。从图 2 中可以看出,10ns 达到饱和态。饱和后微波输出功率很大,0~60ns 平均功率为 4.97GW。图 3 是输出微波的傅里叶频谱分析图。从图中可以测出主频约为 1.9GHz,属于 L 波段,且单频性很好。

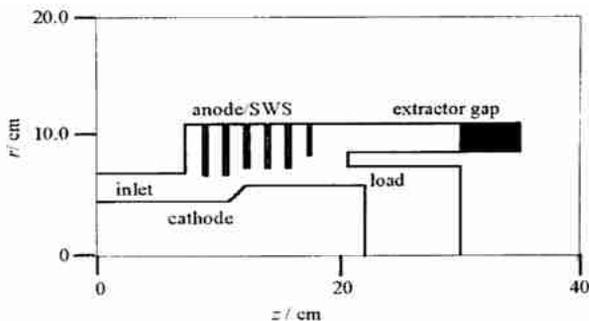


Fig. 1 Configuration of the MILO
图 1 MILO 结构示意图

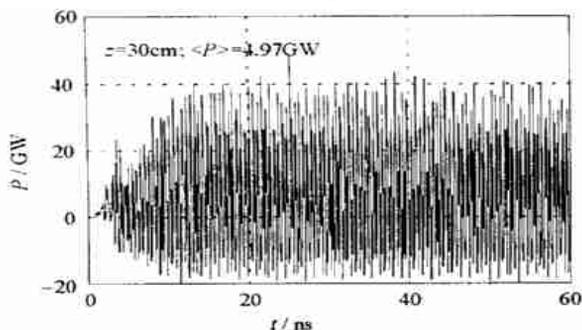


Fig. 2 Output power versus time
图 2 输出功率随时间变化图

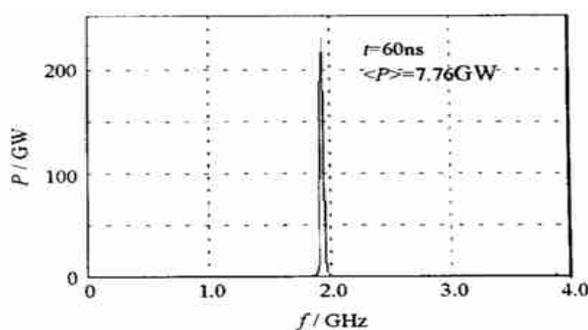


Fig. 3 Fourier spectrum of the signal
图 3 傅里叶频谱分析

图 4 是电场强度的空间分布图,微波模式为近模。从图 5 可以看出粒子群聚性良好。

图 6 和图 7 分别是径向电场 E_r 和轴向电场 E_z 沿 z 向的分布图。从图 6 可以测出,在 MILO 入口处(0~10.80cm 区域), E_r 最大值为 245kV/cm,小于直流电场击穿域值 250kV/cm^[7],即入口处没有发生直流击穿;从图 7 可以测出,在主慢波结构对应的束波相互作用区(12.10~20.50cm 区域), E_z 最大值为 800kV/cm,小于 1MV/cm 的交流击穿域值,即没有发生射频击穿。

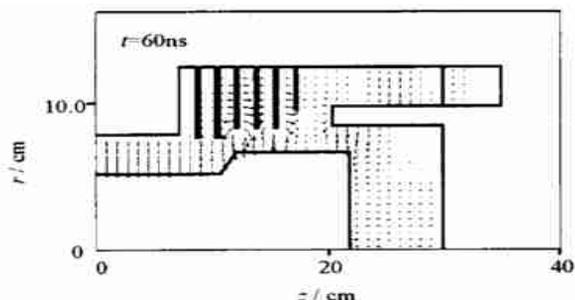


Fig. 4 Spatial distribution of E-field
图 4 电场强度的空间分布

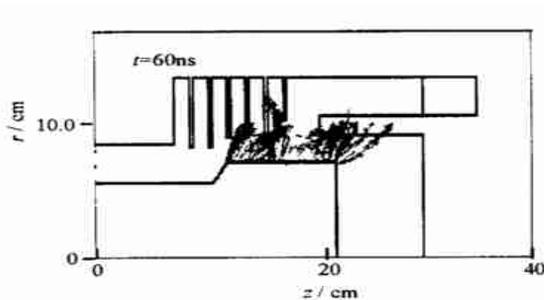
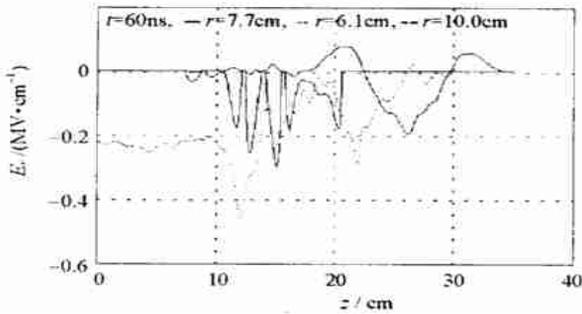
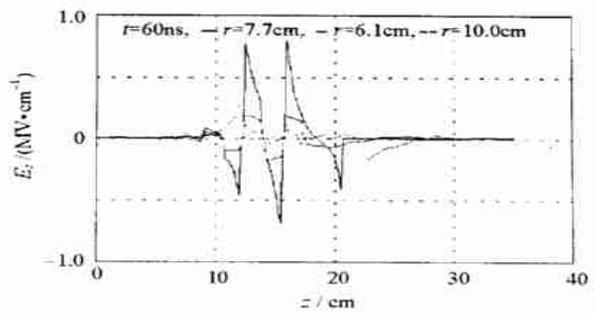


Fig. 5 Trajectories of the particles
图 5 粒子轨迹

Fig. 6 Spatial distribution of E_r 图 6 径向电场 E_r 的空间分布Fig. 7 Spatial distribution of E_z 图 7 轴向电场 E_z 的空间分布

4 结论

本文对文献[1]中的 MILO 结构进行了改进:在保持慢波叶片数不变的情况下,通过减小阴极杆的长度及慢波结构周期和叶片的厚度缩短了 MILO 的长度;通过减小慢波叶片的长度及阴阳极间隙减小了 MILO 的半径。使得改进后的 MILO 结构更加紧凑;同时阴极杆长度的缩短,使得控制电子束的对称发射难度降低,提高了器件运行的技术可行性;阴极杆半径和直径的减小避免了 MILO 入口处的直流击穿,使得场强击穿不成问题。利用全电磁 PIC 粒子模拟的方法对改进后的结构进行了优化。利用优化后的 MILO 结构,在工作电压为 550kV,二极管电流为 82kA 的条件下,获得了很强的微波输出;饱和后平均输出功率达 5.4GW;束波转换效率达 12%。该装置主频为 1.9GHz,属于 L 波段。该装置克服了文献[1]中 MILO 结构存在的主要缺点,有利于 MILO 器件的小型化和实用化。

参考文献:

- [1] Lemke R W, Calico S E, Clark M C. Investigation of a load-limited, magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, **25**(2): 364—373.
- [2] Shiffler D, Baca G, Englert T, et al. Investigation of RF Brakedowns on the MILO[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**(3): 304—311.
- [3] 杨郁林,丁武. MILO 物理分析与数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5): 623—627. (Yang Y L, Ding W. MILO physic analysis and numerical simulation. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 623—627)
- [4] 丁武. 磁绝缘线振荡器中空间电荷的调制[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(2): 213—216. (Ding W. Modulation of the space charge in MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2): 213—216)
- [5] 丁武,杨郁林. 磁绝缘线振荡器中空间电荷的辐射[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1): 115—118. (Ding W, Yang Y L. Radiation of the space charge in a magnetically insulated transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1): 115—118)
- [6] 刘松,刘永贵,舒挺,等. 渐变型 C 波段磁绝缘线振荡器[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(1): 93—96. (Liu S, Liu Y G, Shu T, et al. Tapered C-band magnetically insulated transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1): 93—96)
- [7] 杨郁林,丁武. 高频大功率磁绝缘线振荡器的理论设计. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(1): 76—78. (Yang Y L, Ding W. Design consideration of high power high frequency MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1): 76—78)

Particle simulation of a compact L-band magnetically insulated transmission line oscillator

FAN Yu-wei^{1,2}, SHU Ting¹, LI Zhi-qiang¹

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2. Zhengzhou Air Defence Forces Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A compact L-band magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) is configured with the reduction of the radius and the length of the cathode, the anode-cathode gap, the length and the thickness of the vanes and the period of the slow-wave structure. With the use of a 2.5 dimensional fully electromagnetic particle-in-cell code, high power microwave is generated from the device with the average output power of 5.5 GW, the frequency of 1.9 GHz and the efficiency of 12%. Breakdown can be avoided in the compact MILO and the symmetry of beam emission can be controlled easily.

Key words: MILO; Slow-wave structure; High-power microwave; PIC method