

文章编号: 1001-2486 (2001) 03-0030-05

C 波段磁绝缘传输线振荡器数值模拟与分析*

刘松, 刘永贵, 舒挺, 钱宝良

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 用二维全电磁 PIC 方法对改进的磁绝缘传输线振荡器 (MILO) 进行了模拟, 对 MILO 的各项参数进行了研究, 得到输入电压和慢波结构对 MILO 输出影响的规律。同时在实验上观察到与数值计算相一致的 MILO 工作主频不随输入电压变化的结果以及实验上证实 MILO 有明显的起始工作电压。

关键词: PIC 方法; 磁绝缘传输线振荡器; 高功率微波

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

C-band Magnetically Insulated Transmission Line Oscillator Simulation and Analysis

LIU Song, LIU Yong-gui, SHU Ting

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: New magnetically insulated line oscillator (MILO) designs with modified structures are presented and simulated by 2D particle-in-cell (PIC) code. Relations among some parameters are analyzed. The output varying with input voltage and slow wave structure is found. That the operating frequency remains unchanged with input voltage is proved numerically and experimentally. Experiments also show that a start voltage is need for MILO to work.

Key words: PIC simulation; magnetically insulated transmission line oscillator (MILO); high-power microwaves (HPM'S)

Collins 等人 1988 年首先提出了磁绝缘线振荡器 (MILO) 的概念^[1,2], 就是在传统的磁绝缘传输线的阳极外筒上加上金属慢波结构, 电子与该慢波结构相互作用产生高功率微波输出。MILO 是正交场器件, 它不同外加磁场, 而是通过管子的内部电流产生自磁场来实线磁绝缘。MILO 的自磁场方向与其内部电场方向正交, 能阻止电子从阴极漂移到阳极。由于 MILO 的部分输入电流用于产生自绝缘磁场, 只有部分输入电流用于参与 RF 能量转换, 但是这两部分电流都必不可少, 因此就有一个优化选择参数, 从而保证有较高 RF 能量转换效率的问题^[3]。

1 MILO 的物理模型

模拟的 MILO 结构沿轴线的剖面图如图 1 (a) 所示, 其阳极慢波结构由 15 片叶片组成。每个叶片内半径为 4.2cm, 外半径 5.7cm, 厚度 0.1cm, 阴极杆和阳极电子收集杆的半径同为 2.8cm, 图中下部的虚线为轴线。

图 1 (b) 为文献 [4] 中的 MILO 沿轴线的剖面图, 图中下部的虚线是中轴线。该 MILO 的工作频率为 1.176GHz 处于 L 波段。在 MILO 左端加上电压后, 从阴极杆前端伸入阳极电子收集筒的部分发射出来的电子束被收集筒的内表面吸收, 这部分电子束流称为负载电流, 其功能是产生一个围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, 因此负载电流也称为磁绝缘电流。阴极杆中后部侧面发射的电子束用于参与 RF 能量转换。在这种方式中通过调整阳极叶片内半径、收集筒内半径和阴极杆半径及伸入阳极电子收集筒的长度, 能够改变两部分的阻抗, 调整负载电流即磁绝缘电流在总输入电流中所占比例。

本文工作的目的是希望 MILO 工作在 C 波段, 由于文献 [1] 和模拟结果都显示微波频率随 MILO

* 收稿日期: 2000-12-23

基金项目: 国家 863 激光技术技术领域基金资助课题 (863-410-7)

作者简介: 刘松 (1968-), 男, 在读博士生。

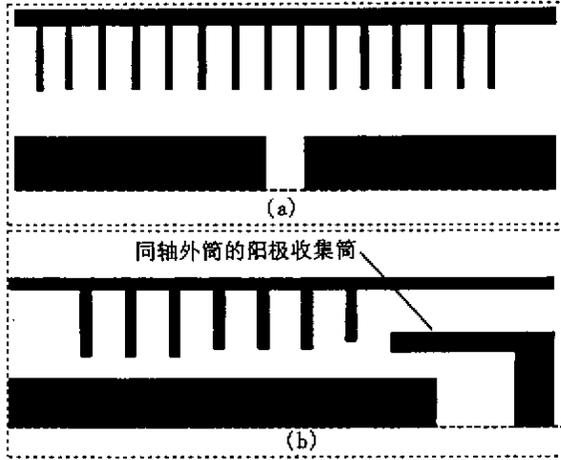


图 1 MILO 结构示意图

Fig.1 The schematic of MILO

(a) this paper (b) Ref. [4]

的空间尺寸减小而单调增加，所以必须把 MILO 的空间尺寸压缩得比文献 [4] MILO 小很多。在这种空间尺度下，如果仍采用图 1 (b) MILO 的结构使磁绝缘电流侧向发射的方式会造成最后一个叶片到阳极收集筒的间隙很小，不利于腔内微波向外传输。由于阳极收集筒的目的只是使得深入到阳极收集筒内的阴极杆有电子束发射，于是在慢波区才能有角向的自绝缘磁场产生。参照 David 等人设计的简单型 MILO^[5]，我们取消了阳极收集筒的同轴外筒结构，采取了磁绝缘电流从阴极杆端面轴向发射到阳极的方式，合理调节阴极杆端面到阳极收集筒端面的距离，使得负载二极管的阻抗和负载电流达到要求。

在工作时 MILO 中的负载电流必须大于给定输入电压时的自绝缘电流^[2]

$$I_{cr} = I_a \gamma_a \beta_a \tag{1}$$

其中， $I_a = 8.5\text{kA}$ ， $g = 37.7\Omega / (2\pi Z_0)$ ， $Z_0 = 60 \ln(r_a / r_c) \Omega$ ， r_a 是阳极叶片的内半径， r_c 是阴极杆半径， β_a 是电子漂移速度除以光速， γ_a 是相对论因子。

从公式 (1) 中可以看出，当阴极杆半径小于阳极叶片内半径时（器件结构自动满足该条件），自绝缘电流随阴极杆半径的增加而单调增加。所以，减小器件的空间尺寸使得阴极杆半径减小，有利于降低给定输入电压时 MILO 工作所需的负载电流。

MILO 的阴极杆发射电流分为侧面发射电流和端面发射电流。端面发射的电流在阴极杆和阳极慢波结构间形成角向磁场。侧面发射的电流在阴阳极间径向电场和角向磁场共同作用下产生沿轴向向右 ($E \times B$) 方向的漂移，当这部分电流的漂移速度与阳极慢波结构微波场的相速度相当时，电子束流与场相互作用，电子束流的动能转换为场的能量，在合理选择结构参数条件下有可能产生高功率微波。

在模拟中考虑了电子束的空间电荷效应。各个器件被当作理想导体，左端加入的电压由下面模型给出：

$$V(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ (t/t_0)V_m, & 0 \leq t < t_0 \\ V_m, & t > t_0 \end{cases} \tag{2}$$

其中， t_0 和 V_m 分别为前沿上升时间和最大电压值。

电子从阴极表面场致发射，发射区域从第一叶片到阴极末端的整个端面。在最右端截面作 Poynting 矢量积分得到功率，频率由 Fourier 分析得出。

2 数值模拟结论

2.1 电子聚束和微波产生

电子聚束过程的模拟结构如图2所示。图中左边三幅图形分别为 $t = 5\text{ns}$ 、 10ns 、 50ns 时的电子运动状态图,右边三幅曲线分别对应左边 $t = 5\text{ns}$ 、 10ns 、 50ns 时的输出频谱图。从图中可见在加上输入电压后,随着时间的推移,阴极杆侧面发射出来的电子流经历了无轮辐、轮辐形成到轮辐进一步加强的过程,同时输出的微波功率逐步提高,能量也逐渐集中到中心工作频率上去。

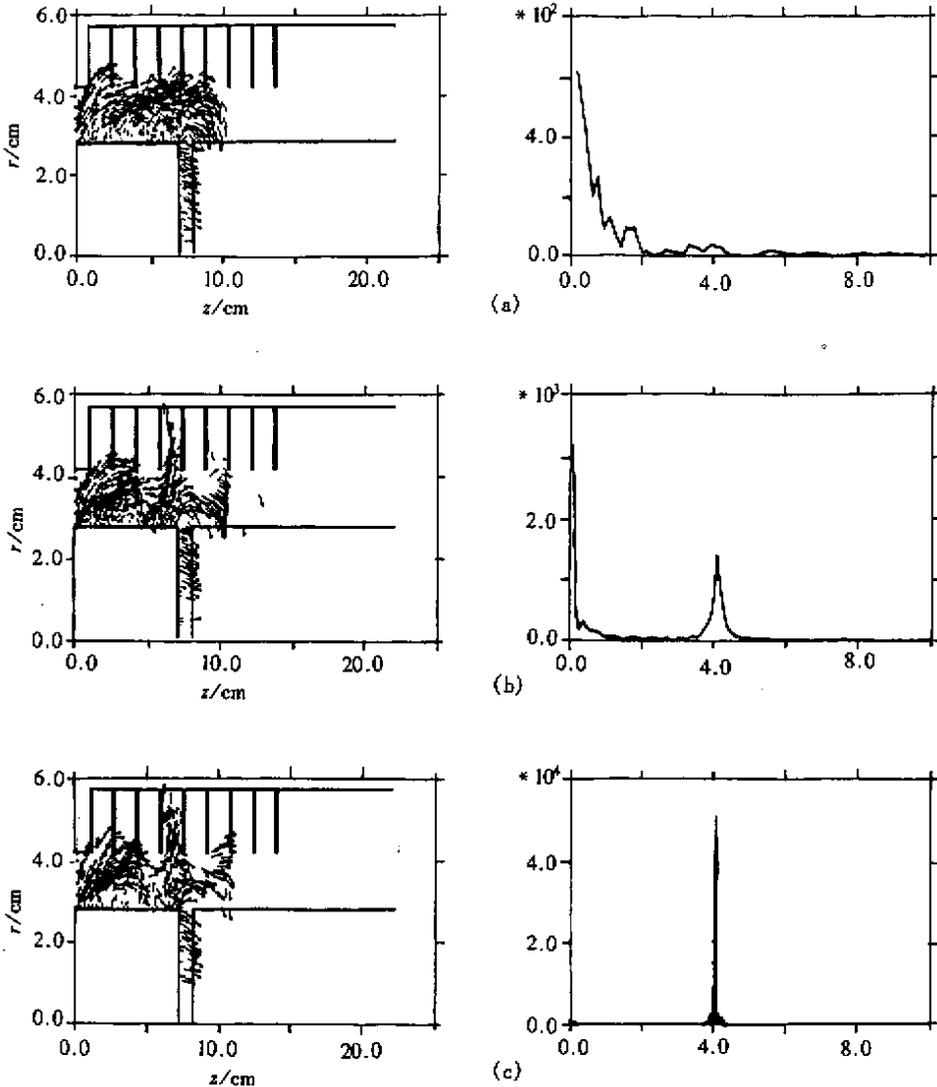


图2 不同时间腔内电子运动(左)和相应时间的输出频谱图(右)

Fig.2 Particle distribution (left) and the power spectrum (right) of MILO (a) $t = 5\text{ns}$ (b) $t = 10\text{ns}$ (c) $t = 50\text{ns}$

2.2 慢波结构对 MILO 的影响

在输入电压电流不变的情况下,分别研究了阴极长度、阴极半径、阴阳极间距、慢波叶片间距、外腔半径等因素对 MILO 工作的影响。模拟结果显示阴极长度、阴极半径、阴阳极间距三项对 MILO 的工作频率基本上没有影响,但是这三项的改变会引起 MILO 工作阻抗的改变,尤其阳极长度和阴阳极间距的变化会导致 MILO 内部阻抗分布的明显变化,使得输出功率发生变化。如图3所示为慢波叶片间距、外腔半径对 MILO 工作频率的影响。从图3可见 MILO 工作主频随着慢波叶片间距的增大而单调减小,MILO 工作主频随着外腔半径的增大而单调减小。由此可见:MILO 工作主频随慢波结构。

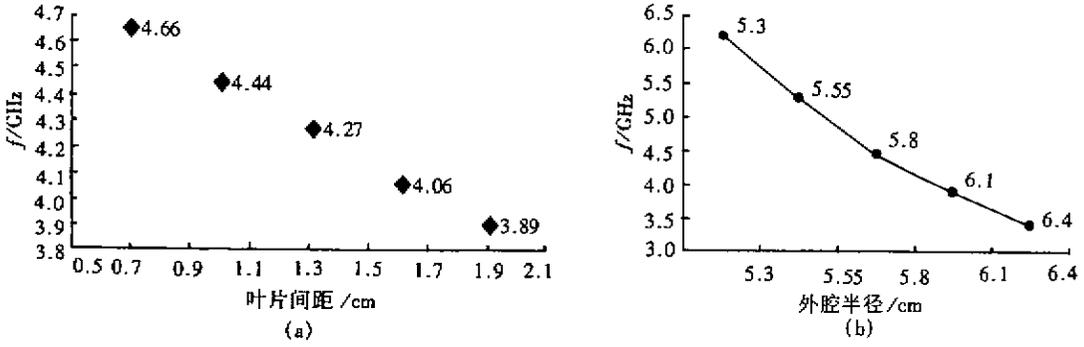


图 3 慢波叶片间距、外腔半径对 MILO 工作频率的影响

Fig.3 Operational frequency of MILO versus the period of vanes versus the radius of outer conductor

2.3 MILO 在不同输入电压下的表现

表 1 为不同输入电压条件下的 MILO 输出的计算结果。从表 1 可以看出正常工作情况下 MILO 的工作主频对于输入电压的变化不敏感。但是 MILO 的输出功率对输入电压的变化较为敏感。在本文的参数条件下，输入电压在低于 600kV 时，输出功率随电压增长很慢，原因是此时负载二极管阻抗在低压时较大^[6]，所以负载电流小，未达到磁绝缘。阴极侧面发射的电子束基本上是直接穿过阴阳极间距打到阳极叶片上，与阳极慢波结构作用很弱，输出微波功率很低。600kV 到 800kV 时，二极管的阻抗降低^[6]，使得负载电流渐渐达到磁绝缘的要求，越来越多阴极侧面发射的电子在角向磁场作用下发生偏转，并与慢波结构发生较强相互作用，所以在 600kV 到 800kV 范围内输出功率随输入功率线性增加。输入电压超过 1000kV 后负载电流产生很强的绝缘磁场，从阴极杆侧面发射出来的电子在远未到达阳极叶片的位置被角向磁场偏转，电子束与慢波结构相互作用减弱。所以，随着输入电压的进一步提高，输出功率不再继续提高，甚至有所降低。

表 1 MILO 在不同电压下的输出结果

Table.1 Relation of output power and frequency of MILO with voltage

输入电压 (kV)	400	500	600	700	800	900	1000	1100
输出功率 (GW)	0.094	0.226	0.43	1.45	2.56	2.37	2.59	1.92
工作频率 (GHz)	无	4.42	4.42	4.44	4.44	4.3	4.4	4.32

图 4 为 400kV (上) 和 500kV (下) 输入电压, $t = 50\text{ns}$ 时腔内电子运动图与输出频谱图。从图 4 可以看出在 400kV 时 MILO 阴极杆发射的电子基本上是直接打到阳极慢波结构上，没有形成磁绝缘，所以就没有明显的工作主频。到 500kV 时能够看到有部分电子已经向右偏转，有形成聚束的趋势，所以在输出频谱图上能看到明显的工作主频。结合图 4 可以看出 MILO 具有与其结构相应的起始工作电压。当输入电压低于此电压时，MILO 负载区电流产生的自磁场不足以使得电子束发生偏转，电子束在阴极杆与阳极慢波结构间不能达到磁绝缘状态，电子束的动能不能有效地利用阳极慢波结构转化为微波场能，此时 MILO 无法正常工作，主频峰值不明显，微波输出功率很低或者没有。

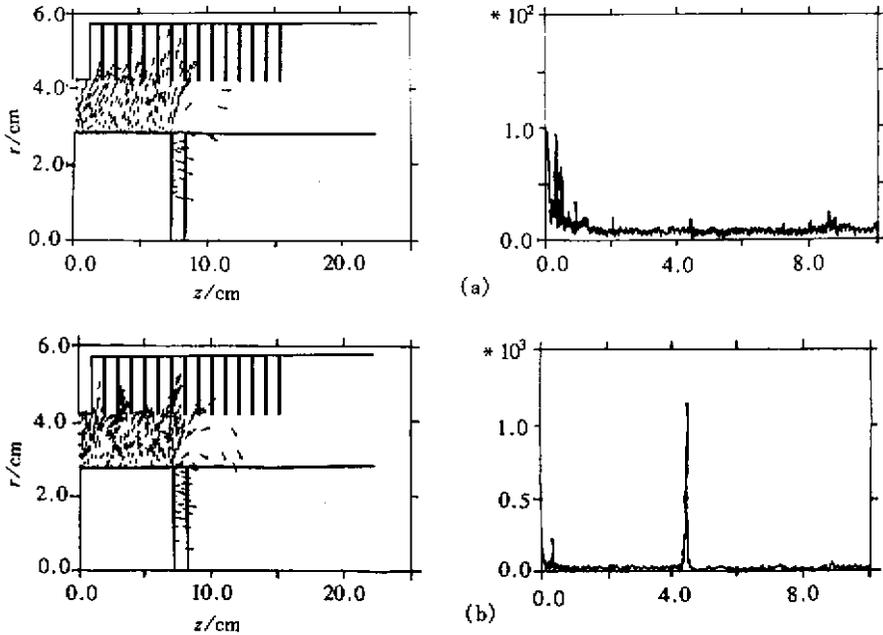


图4 400kV(上)500kV(下)输入电压时腔内电子运动图(左)输出频谱图(右)

Fig.4 Particle distribution (left) and the power spectrum (right) of MILO (a) $V = 400\text{kV}$ (b) $v = 500\text{kV}$

本文的模拟结构被用于设计 C 波段 MILO。加工装配完成的 MILO 在水线加速器上得到了频率为 5.9GHz 不随输入电压改变的微波输出,并且在 310kV 附近观察到明显的起始工作电压。为了配合水线工作,实验中对负载二极管阴阳极间距进行调整,导致了实验得到的工作主频和起始工作电压与模拟计算的差别。

参考文献

- [1] Clark M C, Marder B M, Bacon L D. Magnetically Insulated Transmission Line Oscillator [J]. Appl phys lett, 1988, 52 (1): 78~80.
- [2] Lemke R W, Calico S E and Clark M C. Investigation of a Load-Limited, Magnetically Insulated Transmission Line Oscillator (MILO) [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1997, 25: 364~374.
- [3] Calico S E, Clark M C, Lemke R W, et al. Experimental And Theoretical Investigations of a Magnetically Insulated Line Oscillator (Milo) [J]. Proc. SPIE [C] 1995, 2557: 50~59.
- [4] Haworth M, Allen K, Baca G et al. Recent Progress in the Hard-Tube MILO Experiment [J]. Proc. SPIE [C] 1997. 3158: 28.
- [5] David E T F, Ashby J W, Eastwood et all. Comparison between experiment and computer modeling for simple MILO configurations [J]. IEEE Trans. Plasma Sci. 1995, 23: 959-969.
- [6] 米勒 R B. 强流带电粒子束物理学导论 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.

