

文章编号: 1001-4322(2001)01-0093-04

渐变型 C 波段磁绝缘线振荡器*

刘 松, 刘永贵, 舒 挺, 钱宝良

(国防科技大学 理学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 用二维全电磁 PIC 方法对具有渐变尺寸的磁绝缘线振荡器(MILO)进行了数值模拟。研究这种改进型的 MILO 装置在 C 波段获得最大功率输出的参数条件, 并从物理上阐述了它比传统的同轴 MILO 装置功率有所提高的物理机制。

关键词: PIC 方法; MILO; 高功率微波; 渐变结构

中图分类号: TN753.4 **文献标识码:** A

M. Collins 等人 1988 年首先提出了磁绝缘线振荡器(MILO)^[1~3]的概念。就是在磁绝缘传输线的阳极外筒上加上金属慢波结构, 用于产生高功率微波输出。MILO 是正交场高功率微波器件, 通过管子的内部电流产生自磁场, 用于阻止电子从阴极漂移到阳极。由于在 MILO 中部分输入电流被用于产生其自绝缘磁场, 另一部分输入电流参与 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, 从而保证有较高的 RF 能量转换效率问题^[4]。渐变型 MILO^[5]是在同轴型 MILO 的基础上渐次改变阳极慢波结构中叶片高度而形成的新型结构, 此结构改善了 MILO 的工作状态, 可以提高微波输出功率。

1 物理机制

图 1 为简单的同轴输出型 MILO 结构沿轴线的剖面图, 图中下部的点划线为轴线, 斜线部分为阴极杆(半径 r_c), 黑色部分为阳极, 包括阳极慢波结构叶片(内径 r_{ai} , 外径 r_{ao} , 内外径之差为腔深度 h , 叶片间距 d_s , 叶片周期 L)和阳极电子收集杆。阳极电子收集杆和阴极杆形成负载二极管(间距 d_c)。我们把 MILO 慢波结构看作是一系列被叶片所隔离出来的小谐振腔, 腔的宽度为叶片的间距(d_s), 深度为叶片内外半径的差值(h)。

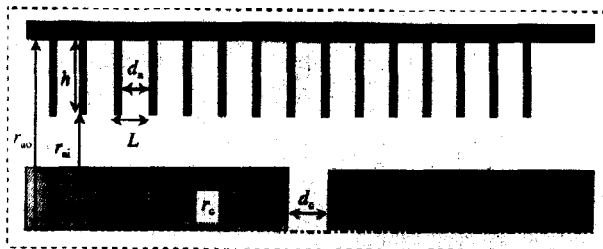


Fig. 1 The structure of a simple MILO

图 1 简单的同轴输出型 MILO 结构示意图

MILO 装置产生高功率微波的物理机制简单来说是这样的: 在左端加载适当的输入电压使得电子从阴极杆的侧面和端面发射出来。端面发射出来的电子向右运动到阳极收集杆, 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, 因此也称为磁绝缘电流。侧面发射的电子在阴阳极间径向电场和环形磁场共同作用下产生沿轴向向右($E \times B$)方向的漂移, 当这部分电子的漂移速度与阳极慢波结构微波场的群速度相当时, 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。

MILO 是与磁控管相似的正交场装置, 其绝缘磁场的大小对该类装置的运行特征有重要影响^[6]。当绝缘磁场很大时, 阴极杆侧面发射出的电子被紧紧约束在阴极杆周围, 不能得到足够的动量与阳极慢波结构相互作用, 不能实现微波振荡, 也就是说此时绝缘磁场高于 Buneman-Hartree 阈值, MILO 处于截止区。同理, 当围绕阴极杆的绝缘磁场太小不能实现磁绝缘时, 即磁场低于 HULL 截止条件, 阴极杆侧

* 收稿日期: 2000-07-09; 修订日期: 2001-11-03
基金项目: 国家 863 激光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, 从事微波源和自适应光学方面研究。

面发射出的电子直接被阳极慢波结构吸收, MILO 处于导通区, 也不能实现微波振荡。HULL 截止条件是在一定电场强度 E 时, 保证在此电场中的电子运动不到阳极的最低磁场强度 B , E 越大, 要求的 B 越大。

图 2 为渐变的同轴输出型 MILO 结构沿轴线的剖面图。图 2 的结构与图 1 结构之间的差别在于 r_{ai} 是变化的。从左端开始, 前几个叶片的 r_{ai} 不变, 这一段结构称为起振段。以后叶片的 r_{ai} 在依次变大, 称为放大段。

简单的同轴输出型 MILO 在其入口处(即上游)由于沿轴流向下流的电子流都要产生角向的磁场, 所以磁场较强, 此处工作于接近 Buneman-Hartree 阈值的状态。沿着阴极杆向下游, 随着 RF 功率的输出和部分电子束被阳极吸收, 角向磁场越来越弱, 最终达到 HULL 截止条件, 沿此处继续向下游阴极杆发射的电子由于没有足够大的角向磁场使之磁绝缘而很快到达阳极被吸收掉。所以, 沿阴极杆轴向达到 HULL 截止条件的位置是 MILO 中的负载二极管间隙的位置。在渐变型 MILO 中, 通过逐渐增加下游阳极慢波结构叶片内半径来降低电场强度, 同时也就降低了对 B 的要求, 增大了电子的活动空间使得电子与波相互作用空间增大了, 这样就能够提高 MILO 的效率和输出功率。

图 3 是简单的同轴输出型 MILO 在正常工作状态时我们模拟所得到的电场矢量瞬时图。从图 3 中的电场矢量指向可以看出此时阳极慢波结构相邻叶片间的电场是反向的, 即工作在 π 模状态。 π 模式振荡在相互作用空间内形成的场具有全驻波的性质, 其群速度为零, 能量不能向外传输。

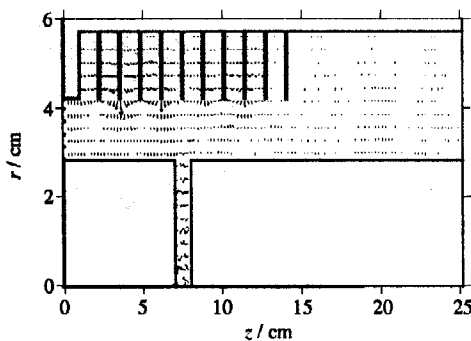


Fig. 3 Vectors of electric field in the simple MILO

图 3 简单 MILO 的电场矢量图

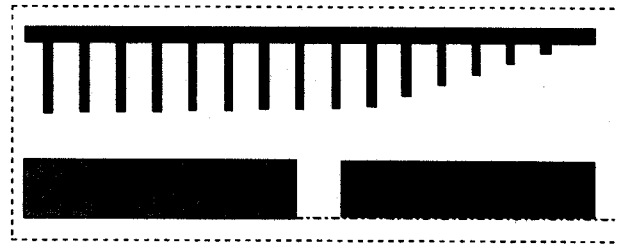


Fig. 2 The tapered MILO structure

图 2 渐变的同轴输出型 MILO 结构示意图

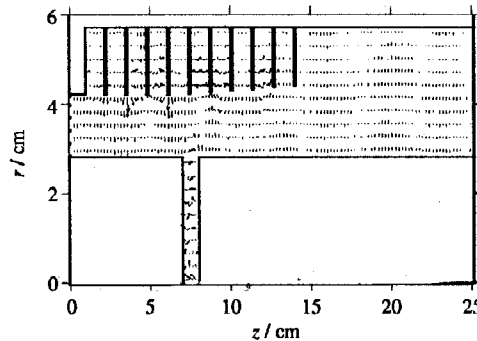


Fig. 4 Vectors of electric field in the tapered MILO

图 4 渐变型 MILO 的电场矢量图

图 4 是渐变型 MILO 在正常工作状态时模拟出的电场矢量瞬时图。将图 3 与图 4 进行比较可以看出, 由于渐变型 MILO 阳极慢波结构叶片内径的渐变使得叶片之间的电场不是完全的 π 模状态, 使得腔内的驻波场被行波场替代了, 因而, 渐变型 MILO 结构易于场能量的传输。

2 模拟输入电压设置

在模拟中自洽考虑了电子束的空间电荷效应。各个器件被当作理想导体, 左端加入的电压为

$$V(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ (t/t_0)V_m, & 0 \leq t < t_0 \\ V_m, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

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。由于装置运行电压不高, 二次电子发射率设置为零。

3 数值模拟结果

对 MILO 的理论分析^[7]表明简单型 MILO 基模的色散曲线如图 5 所示。其中,斜的虚线代表光波,水平虚线在垂直轴上的数值代表 π 模的频率 ω_π 。从图 3 和图 5 可以知道简单型 MILO 工作在 π 模状态,即工作点位于色散曲线的最高点,色散曲线在该点的切线为水平线,群速度为零。

图 6 中上面的两条曲线(重叠比较多)为 MILO 在阴极半径 2.8cm,阳极叶片内半径 4.3cm,阳极外筒半径从 5.5cm 变化到 6.0cm(即腔深度从 1.2cm 变化到 1.6cm)的情况下,输入电压 800kV 时我们通过 PIC 模拟得到的工作频率 ω_π 变化图。

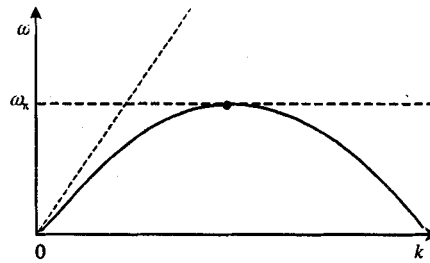


Fig. 5 Primary mode dispersion curve for simple MILO

图 5 简单型 MILO 基模的色散曲线

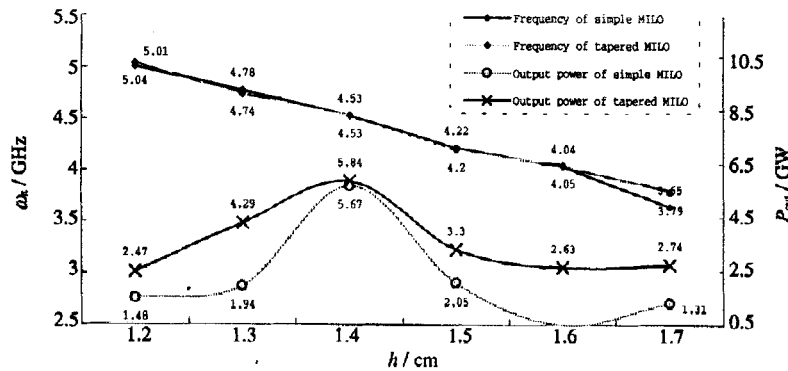


Fig. 6 Operational frequency and output power of MILO vs the depth of their vane cavities

图 6 MILO 工作频率和输出功率随腔深度变化图

从图 6 可以看出,随着阳极慢波结构叶片外半径的增大, ω_π 也增大。将图 5 与图 6 的结果合并起来,我们可以得到如图 7 所示的一系列在结构上只有腔深度 h 变化的 MILO 色散曲线变化图。虚线代表光波和 $h=1.5\text{cm}$ 时的 π 模频率。MILO 叶片的内径越小,即腔深度越大,图 7 中对应的曲线越平缓。

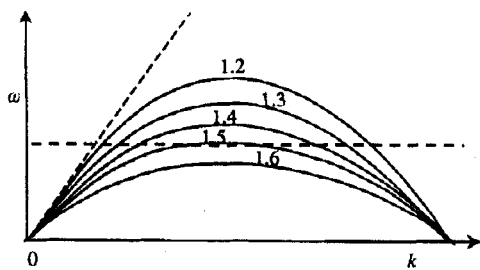


Fig. 7 Primary mode dispersion curves for simple MILOs differing only in the depth of their vane cavities

图 7 一系列仅叶片内径改变的 MILO 色散曲线图

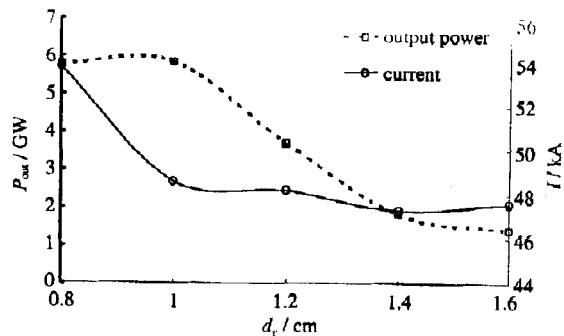


Fig. 8 I and P_{out} of MILO vs the gap of load diode

图 8 工作电流和输出功率随负载二极管阴阳极间距变化图

在色散曲线上某点波的群速等于色散曲线在该点的斜率,从图 7 可见,这一系列 MILO 在相同频率时的群速度随着 h 的减小而增加。所以,在渐变型 MILO 中由于阳极谐振腔深度的渐变导致波群速度的逐渐增大,有利于能量传输出来。

对比图 6 中表示工作频率的两条曲线可以看出,在 MILO 中加入渐变结构以后对于装置的工作频率基本上没有影响。这可以解释为带渐变结构的 MILO 的工作频率是由起振段的慢波结构决定的;电子束在放大段只是与场相互作用使得场被放大。MILO 是正交场装置,其中由于磁场的存在使电子沿直

流等位线横穿直流电场运动;电子流的速度不需增加很多就能通过直流电场,并把电子具有的位能转变为场能量。失掉能量的电子以近似于同步的速度打到阳极被吸收掉。在渐变型 MILO 中电子束在起振段达到同步后,由于正交场器件具有相位聚焦的特点,所以电子束在放大段能够继续保持与微波场的同步而不会工作在放大段自身的 π 模振荡,就是说在图 7 中渐变型 MILO 的工作点会沿着横线向左移动到外面一条色散曲线上,这样频率不变,但群速度增加。

图 6 下部的两条曲线表示在有无渐变结构的情况下输出功率随腔深度的变化图,由此可以看出在其它条件不变的情况下引入渐变结构可以提高 MILO 的输出功率。但是,在不同的结构中引入渐变结构对输出功率的提高效果是不同的。图 6 显示 MILO 的输出功率随腔深度变化,在腔深度 $h=1.4\text{cm}$ 时达到最大,此时的工作频率为 4.53GHz ,处于 C 波段范围。

图 8 为输入电压 800kV 时,渐变型 MILO 的工作电流和输出功率随负载二极管阴阳极间距变化图。从图中可以看出,MILO 在一定的工作电压时有一个最佳的负载二极管阴阳极间距,该间距对应最佳负载电流。当电流太大时,从阴极杆侧面发射出来的电子被负载电流产生的自绝缘磁场紧紧约束在阴极杆附近,离阳极慢波结构较远,MILO 工作在 Buneman-Hartree 阈值附近。当电流太小时,从阴极杆侧面发射的电子由于负载电流产生的自绝缘磁场太小而很快打到阳极慢波结构上,MILO 工作在自绝缘磁场低于 HULL 截止条件区域。以上两种情况都导致输出功率的降低。从数值计算结果可见,当输入电压为 800kV 时的最佳负载二极管阴阳极间距为 1cm 。

5 结 论

从对模拟图像和模拟结果的分析可见:由于 MILO 是正交场器件,具有相位聚焦的特点,在 MILO 中对部分小谐振腔深度引入适当渐变,可以使得在频率不变的情况下工作模式由驻波模变为行波模;同时由于阳极慢波叶片与阴极杆的间距的增加,使达到 HULL 截止条件的区域向下游推移,在径向和轴向都能增加电子束与微波场的相互作用空间,从而优化 MILO 的相互作用结构,提高输出功率。

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, Clark M C. Investigation of a load-limited, magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, **25**:364-374.
- [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.
- [4] Calico S E, Clark M C, Lemke R W, et al. Experimental and theoretical investigations of a magnetically insulated line oscillator (MILO)[A]. *Proc. SPIE*[C]. 1995, **2557**:50-59.
- [5] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**(3):698-712.
- [6] Lau Y Y. Theory of crossed-field devices and a comparative study of other radiation sources[A]. *High power microwave sources* [M]. Granatstein V L, Alexeff I, Eds. Boston, MA, Artech House, 1987. 309-349.
- [7] Lemke R W, Clark M C. Theory and simulation of high-power microwave generation in a magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Appl Phys*, 1987, **62**(8):3436-3440.

Tapered C-band magnetically insulated line oscillator

LIU Song, Liu Yong-gui, SHU Ting, QIAN Bao-liang

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

Abstract: Tapered magnetically insulated line oscillator (MILO) was simulated by 2D particle-in-cell (PIC) electromagnetic code. The parameters of MILO for highest output power in C-band was researched. The physics mechanism about tapered MILO was explained. The mechanism shows that under the same conditions, tapered MILO can output higher power than conventional MILOs.

Key words: PIC simulation; MILO; high power microwaves; tapered MILO