

# 磁绝缘线振荡器中高阶模式的 3 维数值模拟<sup>\*</sup>

孙会芳, 董志伟

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 为了解高频 MILO 实验中高阶模频频出现的原因并考察其对 MILO 器件性能的影响, 利用二次开发的 3 维全电磁粒子模拟程序 KARAT 对 C 波段 MILO 器件进行了模拟研究。在存在非对称激励的情况下由束波互作用可直接导致高阶模的产生, 发现了可与实验中高阶模现象比拟的高阶模, 并对其中频率为 4.01 GHz 的模式做出判定, 认为此模式是由非对称的电子和场在互作用腔中相互作用产生的高阶  $TM_{11}$  模, 并经同轴线传输转化得来。对于频率为 3.67 GHz 和 4.53 GHz 的另两高阶模目前尚不能判断。

**关键词:** 磁绝缘线振荡器; 高阶模; KARAT 程序; 非对称激励

**中图分类号:** TN753.4 **文献标识码:** A

磁绝缘线振荡器(MILO)是由 M. Collins 等人于 1987 年首先提出的<sup>[1]</sup>, 其基本构型是在磁绝缘传输线的阳极外筒内加上金属慢波结构, 以产生高功率微波输出。这种器件已经在 L 波段产生了 3 GW 的微波输出<sup>[2]</sup>, 是高功率微波(HPM)研究领域的热点之一<sup>[3-5]</sup>。中国工程物理研究院在 L 波段已经获得了频率为 1.22 GHz、输出功率大于 1.5 GW、效率约为 10% 的高功率微波实验输出。在 C 波段 MILO 实验中, 在频率为 3.60 GHz 左右的基模状态获得了 500 MW 微波输出。但是在该实验中除了基模以外, 还发现了频率为 3.70 GHz 和 4.07 GHz 的两个高阶模式, 并且在多次实验中重复出现, 甚至有时还会出现高阶模抑制基模, 输出以高阶模为主的现象。由于实验中系统的装配准直、阴极材料性能等多种因素都会导致满足要求的对称激励条件的破坏, 因此高阶模现象一直是困扰高频 MILO 器件的一个重要问题, 我们已对此进行过冷腔分析<sup>[6]</sup>, 本文利用 3 维全电磁粒子模拟程序 KARAT, 对 C 波段 MILO 模型进行了模拟研究, 利用非对称激励机制产生高阶模, 在模拟计算中发现了可与实验中高阶模现象比拟的高阶模的出现。

## 1 MILO 的工作原理

MILO 装置产生高功率微波输出的物理机制是: 从输入端经传输线输入 TEM 波, 在强电场作用下, 电子经爆炸式发射从阴极的侧面发射出来。其中一部分电子向右运动到阳极收集极, 这部分电流称为负载电流, 也叫磁绝缘电流, 其功能是产生一个环绕阴极的角向磁场, 对另一部分电流起磁绝缘作用; 另一部分电子在阴阳极间径向电场和环形磁场的共同作用下产生沿轴向向右的漂移, 合理选择结构参数, 当电子的漂移速度与阳极慢波结构中产生的微波场的相速度相当时, 电子束与微波场相互作用, 电子束流的能量转化为微波场的能量, 产生高功率微波<sup>[7]</sup>。

## 2 数值模拟结果及讨论

针对 C 波段 MILO 的典型模型, 首先使用两种 2 维 PIC 电磁场粒子模拟程序进行了计算, 得出其基模频率为 3.5~3.6 GHz(电压不同会导致频率略有漂移), 与实验中基模频率一致。为了进一步研究高阶非对称模式, 又利用 3 维 PIC 电磁场粒子模拟程序 KARAT 对其进行了计算。

### 2.1 C 波段 MILO 对称基模的数值模拟结果

3 维计算模型如图 1(a)所示, 首先, 在完全对称的条件下得出 C 波段 MILO 的基模( $TM_{00}$  模)场的数值模拟结果, 如图 1(b), (c), (d)所示。由图 1(b)可得输入电压的平均值为 461 kV; 由于在 3 维模型计算中未加支撑, 输出功率中存在直流分量, 得到如图 1(c)所示的瞬时输出功率, 在图中人为估算并扣除直流成分, 可得到输出微波的峰值功率约为 3 GW, 平均功率约为 1.5 GW; 由图 1(d)可得输出微波频率为 3.57 GHz。其各种

\* 收稿日期: 2007-08-14; 修订日期: 2008-01-29

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(20060432)

作者简介: 孙会芳(1974—), 女, 山东省德州人, 副研究员, 从事高功率微波技术研究; sunhui566@sohu.com。

计算结果及物理图像与 2 维程序的计算结果都能较好符合。

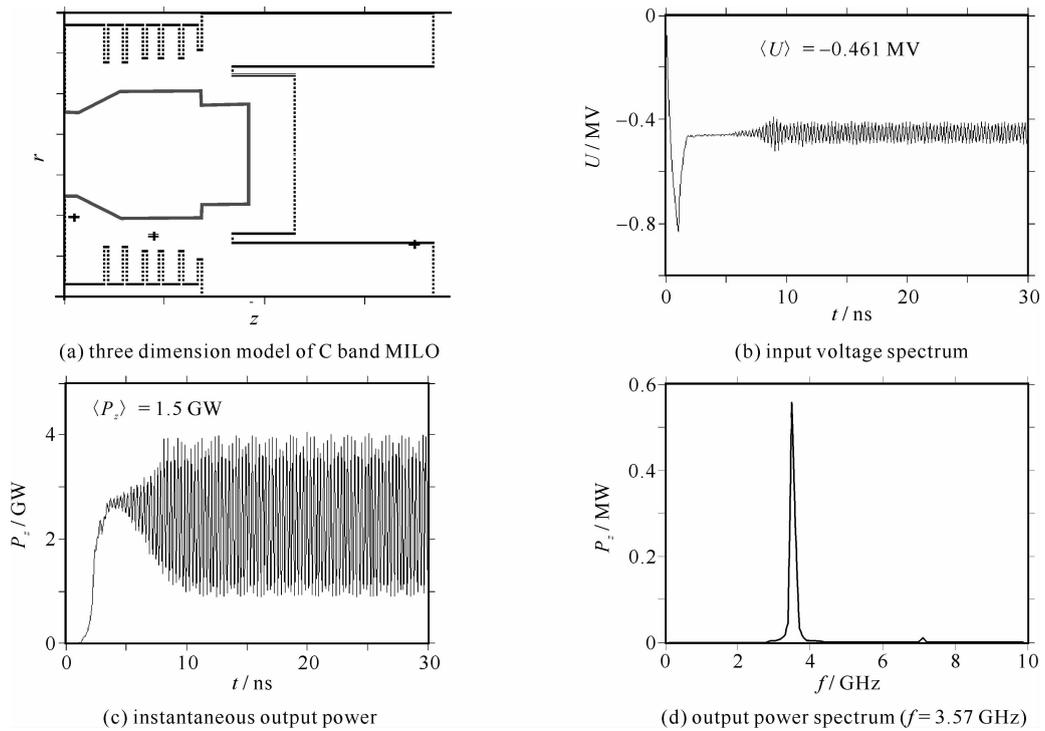


Fig. 1 Numerical simulation spectrum of fundamental mode in C band MILO

图 1 C 波段 MILO 基模的计算结果

## 2.2 C 波段 MILO 非对称高阶模式的数值模拟结果

在相同的输入电压下,我们分别采用不同的非对称条件激励,共得出 3 种不同的电磁场非对称模式输出,分别如图 2~4 所示。

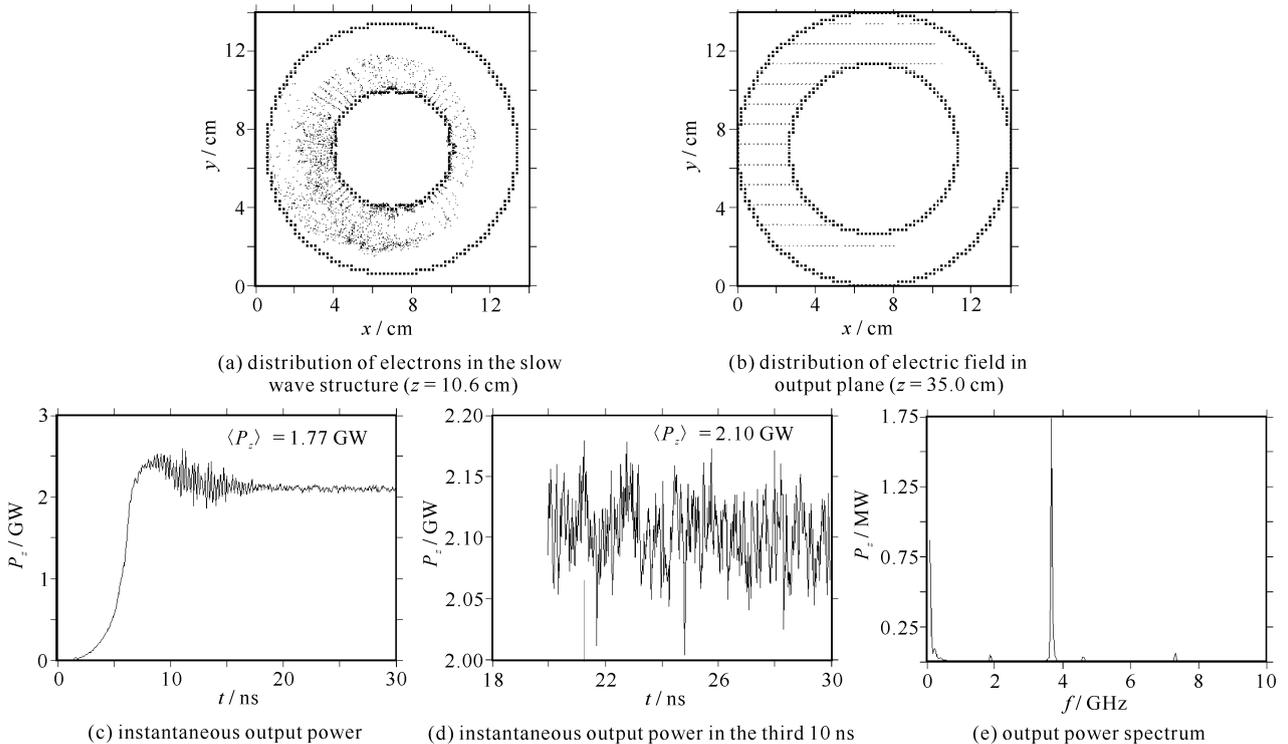


Fig. 2 Numerical simulation spectrum of higher mode in C band MILO ( $f=3.67 \text{ GHz}$ )

图 2 C 波段 MILO 中频率为 3.67 GHz 高阶模的计算结果

由图中各自的相互作用腔中的发射电子分布、输出口的电场场形分布图可以明显看出各模式都是高阶非对称模式,且各不相同。由输出功率谱图可得,其频率分别为 3.67, 4.01, 4.53 GHz,都高于基模频率。由瞬时

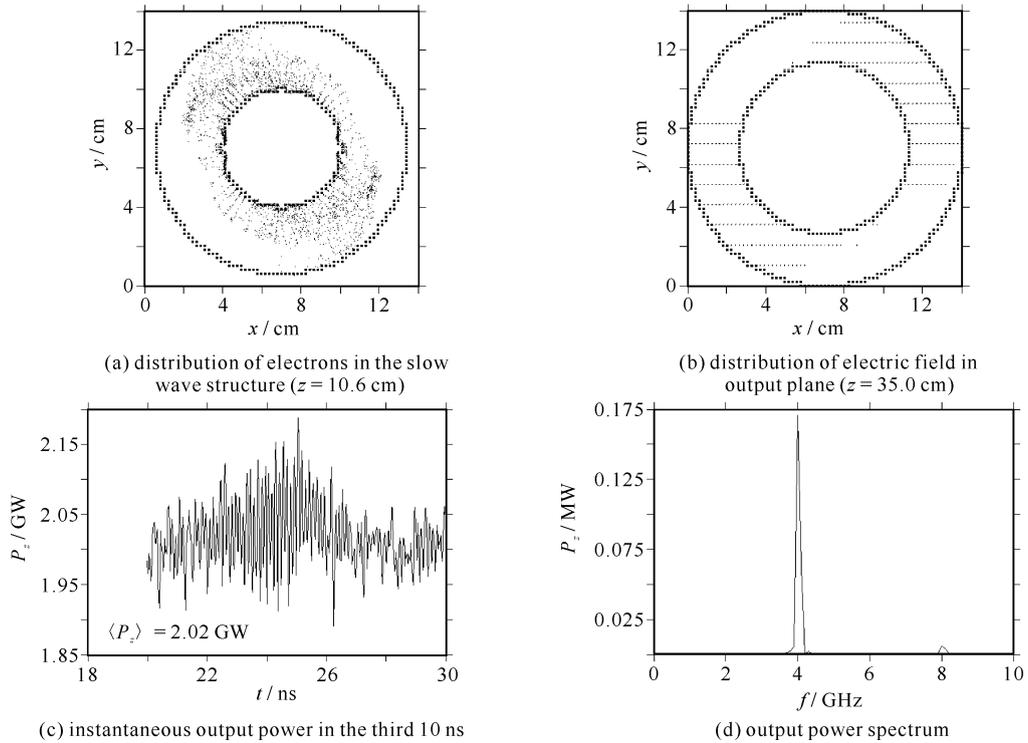


Fig. 3 Numerical simulation spectrum of higher mode in C band MILO ( $f=4.01 \text{ GHz}$ )

图 3 C 波段 MILO 中频率为 4.01 GHz 高阶模的计算结果

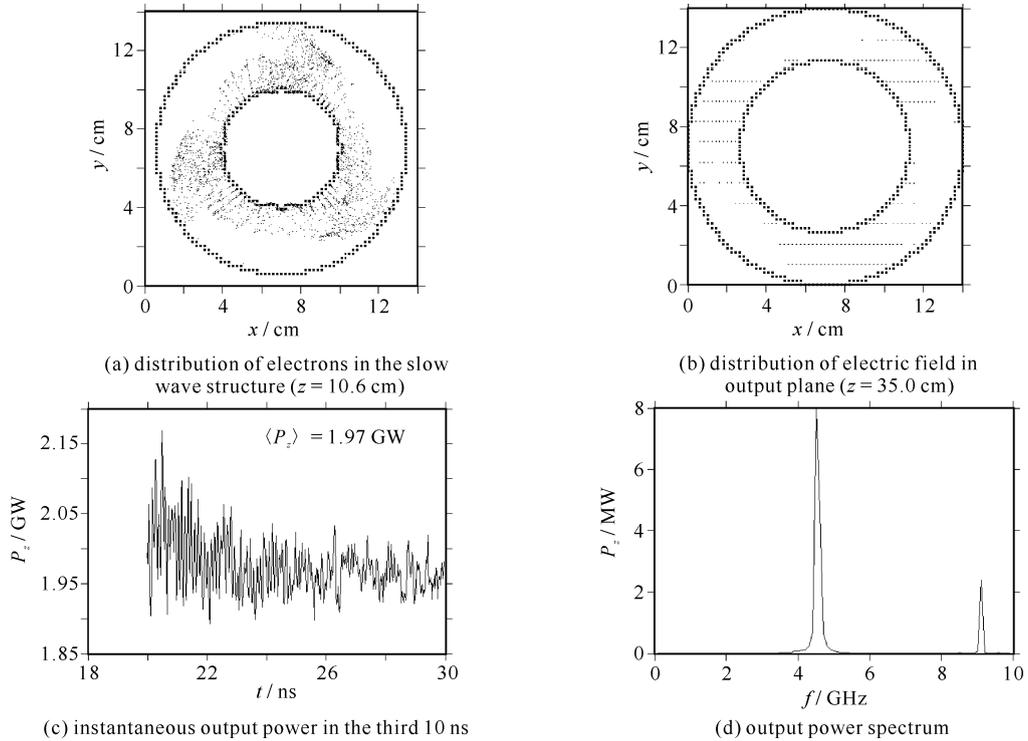


Fig. 4 Numerical simulation spectrum of higher mode in C band MILO ( $f=4.53 \text{ GHz}$ )

图 4 C 波段 MILO 中频率为 4.53 GHz 高阶模的计算结果

输出功率图可见,各个模式的输出微波功率都在百 MW 量级(除去直流成分),都远小于基模的输出功率。

由输出功率谱图可见,每个模式电磁场的频率都很单一,其中有两个模式(即频率分别为 3.67 GHz 和 4.01 GHz)与实验中测得的输出模式频率(3.70 GHz 和 4.07 GHz)基本一致。

从输出微波电场场形分布看,这 3 种高阶模式的场形分布都比较规则,且似乎具有某种规律性,但其中只有频率为 4.01 GHz 的模式(也即实验中产生的频率为 4.07 GHz 的模式)出口处的场形分布和同轴线的  $\text{TE}_{11}$

模场形相似。据此我们认为此模式是由非对称的电子和场在相互作用腔中相互作用产生的高阶  $TM_{11}$ , 并经同轴线传输转化得来。至于频率为 3.67 GHz 和 4.53 GHz 的另两高阶模究竟为何种模式, 是几种模式的简并还是某种单一模式, 目前还不能判断, 将进一步研究。

在模拟中用特定非对称条件激励, 得到以上 3 种高阶模和基模共存的结果, 如图 5 所示, 由图 5(a) 可得其中频率为 3.67 GHz 的高阶模功率较低, 且和基模基本连为一体, 另外两个高阶模都有较高的输出功率。由图 5(b) 可见总瞬时输出功率因为是几种模式的叠加, 较基模的输出功率低, 较单个高阶模的输出功率高, 输出瞬时功率约有 1 GW。

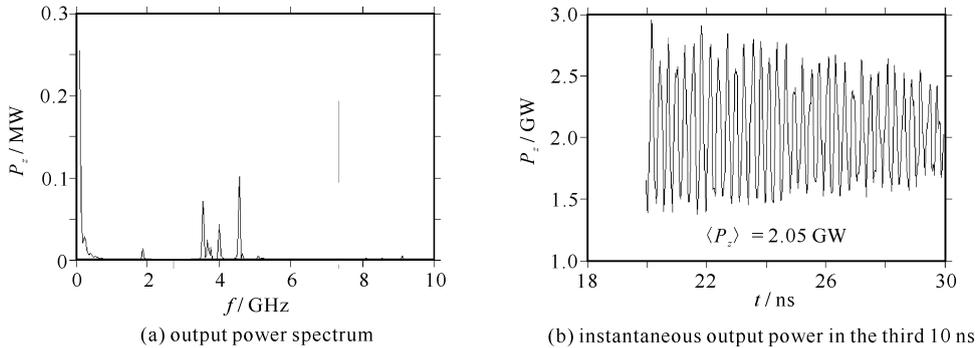


Fig. 5 Numerical simulation spectrum of coexistence of fundamental mode and three higher modes in C band MILO

图 5 C 波段 MILO 中基模和 3 种高阶模式并存的计算结果

### 3 结 论

本文利用 3 维全电磁粒子模拟程序 KARAT, 对 C 波段 MILO 器件进行了模拟研究, 在模拟计算中发现了可与实验中高阶模现象比拟的高阶模的出现, 并对其中频率为 4.01 GHz 的模式做出判定, 认为此模式是由非对称的电子和场在相互作用腔中相互作用产生的高阶  $TM_{11}$  模经同轴线传输转化得来。对于频率为 3.67 GHz 和 4.53 GHz 的高阶模尚需作深入研究。

致 谢 中国工程物理研究院应用电子学研究所的范植开、陈代兵、郭焱华等同志为我们提供了实验数据, 在此深表感谢。

#### 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] Haworth M D, Allen K E, Baca G. Recent progress in the hard-tube MILO experiment[C]//Proc of SPIE. 1997, **3158**:28-39.
- [3] 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**:364-373.
- [4] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**(3):698-713.
- [5] Calico S E. Experimental and theoretical investigations of a magnetically insulated line oscillator(MILO)[C]//Proc of SPIE. 1995, **2557**:50.
- [6] 孙会芳, 董志伟, 杨志渊, 等. MILO 实验模型的频移问题研究[J]. 信息与电子工程, 2004, **2**(2):95-97. (Sun H F, Dong Z W, Yang W Y, et al. Study about frequency shift in a magnetically insulated transmission line oscillator. *Information and Electronic Engineering*, 2004, **2**(2):95-97)
- [7] 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. The tapered C-band MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1):93-96)

## 3-D simulation of higher order modes in MILO

SUN Hui-fang, DONG Zhi-wei

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The C band MILO is simulated by the 3-D PIC code KARAT program in order to study the reason of frequent higher order modes in experiment and their influence on the performance of MILO. Higher order modes are caused by wave-beam action under condition of non-symmetry excitation mechanism in simulation, similar to those found in experiment. The mode of 4.01 GHz is identified and concluded as transformed through coaxial-line from the  $TM_{11}$  mode rising in slow-wave cavities. The other two higher order modes of 3.67 GHz and 4.53 GHz could not be concluded now.

**Key words:** MILO; Higher order mode; KARAT; Non-symmetry excitation