

磁绝缘线振荡器中模式竞争问题的数值模拟*

孙会芳, 董志伟, 杨郁林

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 为理解磁绝缘线振荡器(MILO)实验中频频出现的模式竞争问题,利用 3 维全电磁粒子模拟程序对 C 波段 MILO 的实验模型进行研究,探索各种非对称激励机制对产生微波模式的影响,结果显示:阴极电子随机发射、电压的慢上升前沿、较低的电压等因素都可导致非对称高阶模式的产生,并使输出微波功率大大降低。模拟计算得出 MILO 中存在频率为 3.6 GHz 左右的基模和频率分别为 3.7,4.1,4.6 GHz 左右的 3 种高阶模式,与 Karat 计算结果基本一致。

关键词: 3 维全电磁粒子模拟程序; 磁绝缘线振荡器; 高阶模; 非对称激励; 模式竞争

中图分类号: TN753.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102202.0303

磁绝缘线振荡器(MILO)是由 M. Collins 等人于 1987 年首先提出的^[1],它在 L 波段可产生 3 GW 的微波输出^[2],是高功率微波(HPM)研究领域的热点之一^[3-5]。中国工程物理研究院在 L 波段和 C 波段 MILO 的实验研究中取得了初步成功^[6],但在 C 波段实验研究中,MILO 一直存在模式竞争问题:在频率为 3.60 GHz 左右的基模状态获得了 500 MW 的微波输出,发现了频率为 3.70 GHz 和 4.07 GHz 的 2 个高阶模式,针对这一问题已有研究从理论分析和数值模拟方面进行了探讨^[7]。本文利用 3 维全电磁粒子模拟程序在 C 波段对 MILO 的模型进行研究,探索各种非对称激励机制对产生微波模式的影响,在模拟计算中发现了可与实验及 Karat 计算结果相仿的高阶模的出现^[7]。

1 C 波段 MILO 的 3 维数值模拟

C 波段 MILO 的正常工作模式是沿纵向的 π 模分布^[7]。在 MILO 的实验中,由于系统的装配准直、阴极材料性能等多种因素都可能会使对称激励条件被破坏,导致高阶模的产生,出现模式竞争,因此模式竞争问题一直是困扰 MILO 器件的一个重要问题,但究竟是何种因素引起的鲜有报道。本文在保证模型结构对称的条件下探讨了电压、电流发射方式等基本条件对微波模式的影响。

1.1 电流发射方式和电压上升前沿对微波模式的影响

在 C 波段 MILO 的实验中,阴极材料采用天鹅绒以降低电子发射域值,保证所需的发射电流,其发射方式为等离子体的爆炸式发射,在程序模拟中用随机发射而非均匀发射,更接近实际情况。因此模拟中我们首先考察电子发射方式(随机发射、均匀发射)对产生微波模式的影响。实验提供的电压值一般小于 600 kV,在模拟中我们选择输入电压为 550 kV。

1.1.1 阴极电子随机发射

首先选取阴极电子随机发射,输入电压为 550 kV,电压上升前沿为 2 ns 的矩形电压脉冲,如图 1 所示。图 2 是其数值模拟结果,由图可见:电子的群聚很好,沿纵向为 π 模分布;输出口电场的频谱,主要由 4.1 GHz 的主频和强度大大小于主频的 3.63 GHz 的频率成分组成,其中 3.63 GHz 的频率为 C 波段 MILO 的基模频率^[7],因此在这个条件下已出现了模式竞争,并且高阶模已胜过基模,输出功率以高阶模为主。由瞬时功率谱可得:扣掉直流成分,其输出峰值功率约为 1.5 GW。

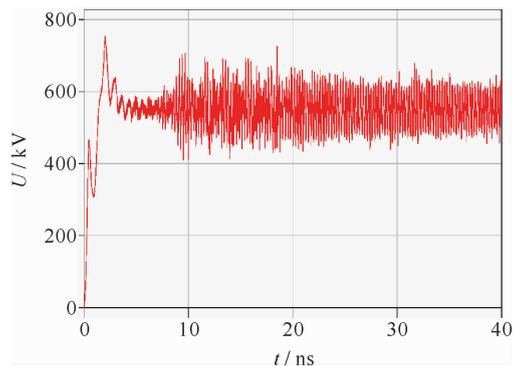


Fig. 1 Input voltage waveform

图 1 输入电压波形

* 收稿日期:2009-03-18; 修订日期:2009-09-01

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。

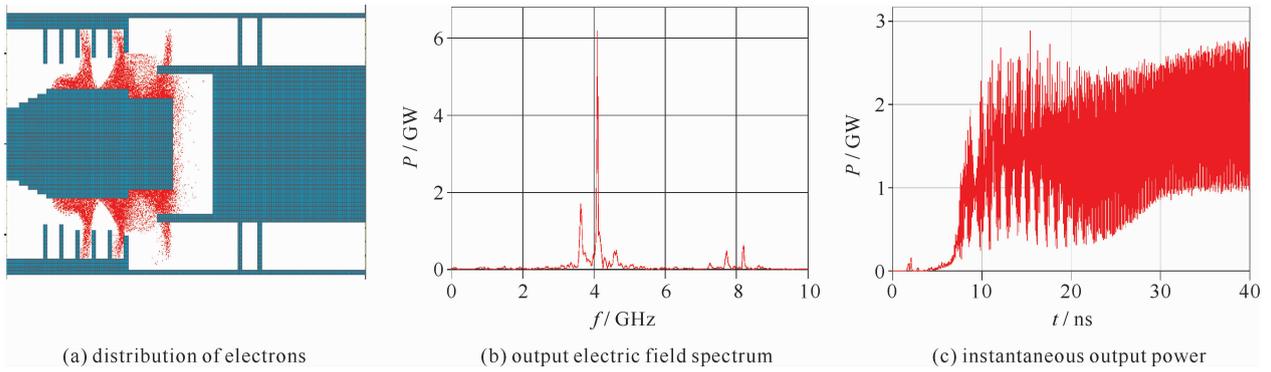


Fig. 2 Numerical simulation results of MILO with random emitting of cathode electrons

图 2 阴极电子随机发射的数值模拟结果

在爆炸式发射下,对阴极等离子体发射均匀性影响最大的因素是阴极表面的微观场强增长率 dE/dt ,它对均匀性的影响与屏蔽效应有关,如果 dE/dt 足够大,屏蔽效应对其影响就会相对较弱,可能不足以引起宏观的电子发射不均匀性。在阴极材料一定的情况下, dE/dt 的大小主要取决于外加场强的增长速率,即外加电压的上升前沿。因此有必要考察不同的电压上升前沿对产生微波的模式和输出功率的影响。

在阴极电子随机发射方式下保持电压不变,仍为 550 kV,改变电压的上升前沿,其上升前沿分别取为 5, 10, 15, 20 ns, 数值模拟结果如图 3 所示。

由图 3 可得:当电压上升前沿为 5 ns 时,输出电场频谱中包含频率为 4.6, 4.1, 3.7 GHz 的高阶模场分量和频率为 3.6 GHz 的基模场分量,其中频率为 4.6 GHz 的高阶模场最强。由于输出功率为这 4 种模式的叠加,其瞬时功率谱是这 4 个模式的合成,因此呈现明显的拍频状态,功率较低,为百 MW 量级;当电压上升前沿为 10 ns 时,输出电场频谱中包含频率为 4.6 和 4.1 GHz 高阶模场分量及频率为 3.6 GHz 的基模场分量,其中频率为 4.1 GHz 的高阶模场最强,输出功率约 1.5 GW;当电压上升前沿为 15 ns 时,输出电场以 4.1 GHz 的高阶模场为主,输出功率约有 1.3 GW;当电压上升前沿为 20 ns 时,输出电场频谱中包含频率为 4.1 和 4.6 GHz 的 2 个高阶模场分量,其中频率为 4.1 GHz 的高阶模场最强,输出功率约为 2 GW。

因此,当阴极电子随机发射时,其输出微波都以高阶模为主,并且电压上升前沿的快慢对输出微波的模式有一定的影响,不同的电压上升前沿会激励起不同的高阶模式。

1.1.2 阴极电子均匀发射

作为对比,保持输入电压仍为 550 kV,电压上升前沿 2 ns,模拟计算了阴极电子均匀发射的输出微波场,其结果如图 4 所示,可得:输出电场以频率为 3.6 GHz 的基模场为主,除去

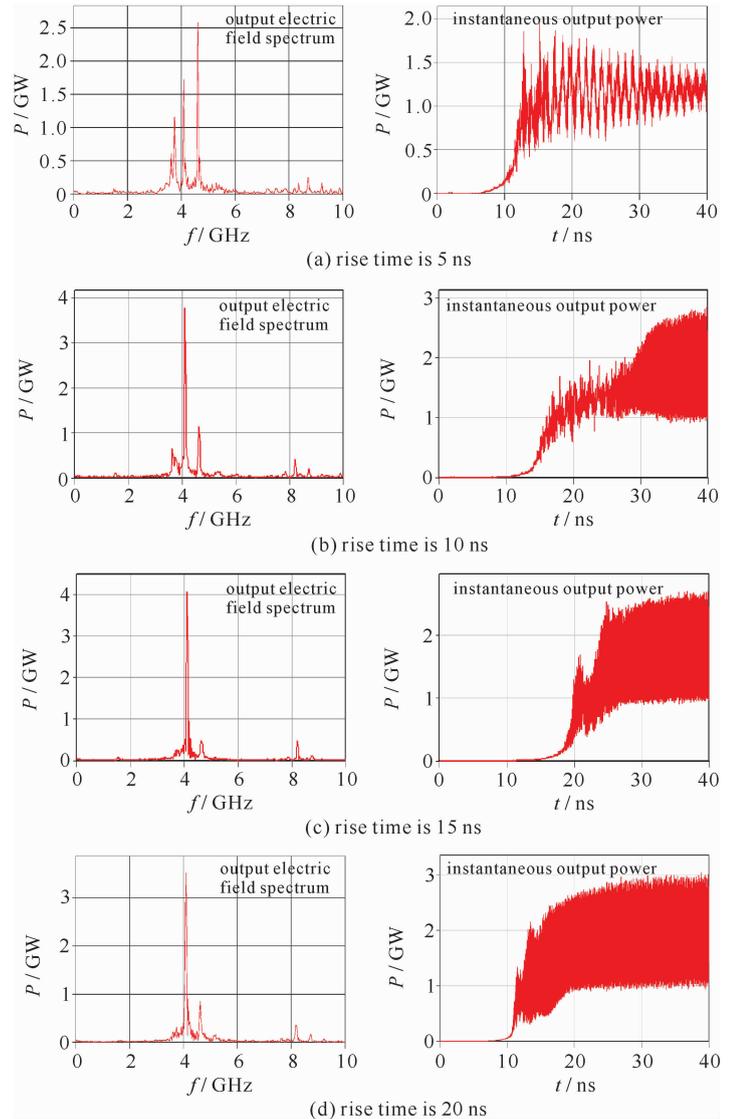


Fig. 3 Numerical simulation results of MILO with random emitting of cathode electrons under different input voltage rise time

图 3 阴极电子随机发射不同电压上升前沿的数值模拟结果

直流成分其输出功率约为 5 GW, 与 Karat 计算结果较为一致^[7]。

保持阴极电子均匀发射, 在电压上升前沿分别为 5, 10, 15, 20 ns 下分别对其进行了计算, 结果基本和图 4 一致, 因此, 均匀发射保证了器件在基模运行, 与电压上升前沿的快慢基本无关。

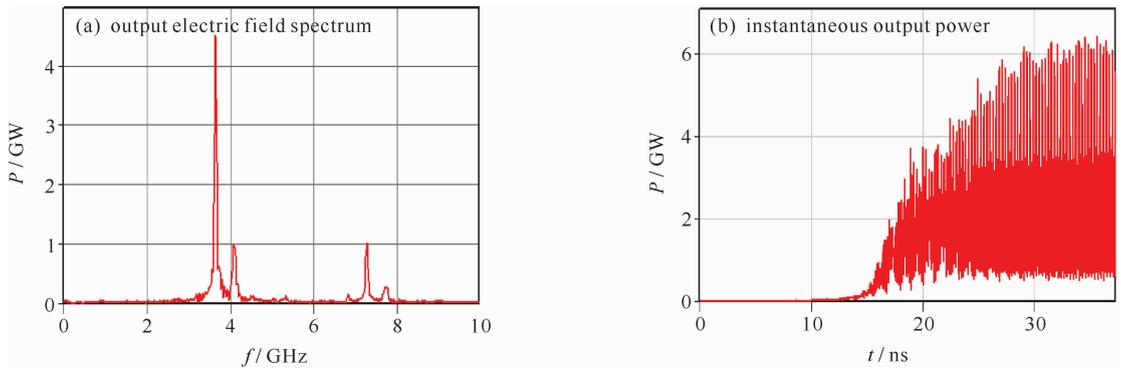


Fig. 4 Numerical simulation results of MILO with uniform emitting of cathode electrons

图 4 阴极电子均匀发射的数值模拟结果

1.2 电压大小对产生微波模式的影响

在实际实验中, 电压大小通常也会影响产生微波的模式。我们采用阴极电子随机发射的方式, 考察电压大小对产生微波模式的影响。电压上升前沿取为 2 ns, 电压大小分别为 1 000, 800, 750, 600, 450 kV, 得到如图 5 所示的数值模拟结果。

由图 5 可得: 在阴极电子随机发射方式下, 当电压高于 750 kV 时输出模式较为稳定, 频率在 3.6 GHz 附近 (频率随电压有小幅变化) 输出功率也较高, 都有几 GW, 输出模式以基模为主; 当电压降至 750 kV 以下时, 产生微波模式不再稳定, 基本以高阶模为主, 并且随着电压的变化, 模式也有所不同, 模拟中得出了频率为 4.6 GHz 和 4.1 GHz 附近的 2 种高阶模式, 伴随着高阶模的出现, 输出微波功率也较基模大大降低, 大约在百 MW 量级。

2 C 波段 MILO 基模和高阶模的场形比较

作为比较, 我们对器件进行了冷腔模拟, 得出频率为 3.62 GHz 的基模和频率为 3.75 GHz 的非对称高阶模的本征场分布, 如图 6 所示, 图中分别给出了 2 种模式电场的轴向分量 E_z 沿纵向切面和相互作用腔中的某横截面的分布图。由图 6

(a) 和图 6(c) 可见: 频率为 3.62 GHz 和 3.75 GHz 的场在相互作用腔中沿纵向都呈现 π 模分布, 因此应分别对应前面热腔计算中得到的某种模式的场。由图 6(b) 可见: 频率为 3.62 GHz 的场沿角向呈现轴对称分布, 应对应于热腔计算中得到的频率为 3.63 GHz 的基模场。由图 6(d) 可见: 频率为 3.75 GHz 的场沿角向呈现明显的非轴对称分布, 应对应于热腔计算中得到的频率为 3.7 GHz 的非对称高阶模式的场。频率为 4.1 GHz 和频率为 4.6 GHz 的另外两个非对称高阶模式的场形分布也呈现明显的非轴对称特征, 不再列出。

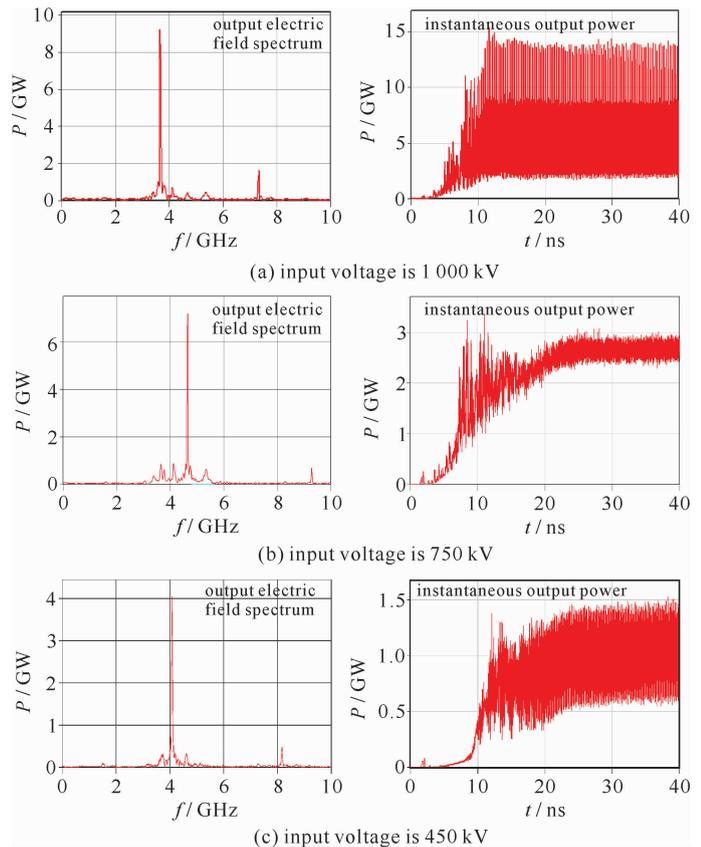


Fig. 5 Numerical simulation results of MILO with random emitting of cathode electrons under different input voltages

图 5 阴极电子随机发射、不同输入电压下的数值模拟结果

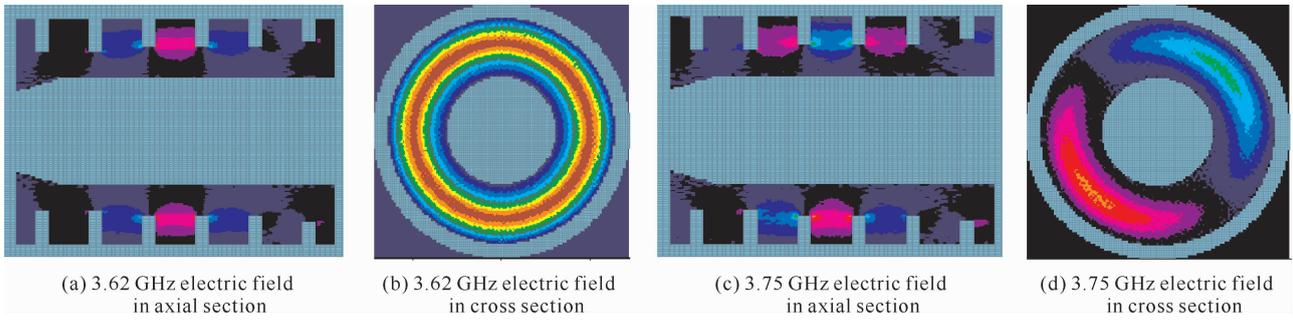


Fig. 6 Electric field distributions of different eigenmodes

图 6 不同模式的场分布

3 结 论

本文利用 3 维全电磁粒子模拟程序对 C 波段 MILO 的实验模型进行研究,探索了阴极电子的发射方式、电压上升前沿、输入电压大小等各种非对称激励机制对产生微波模式的影响。结果显示:阴极电子随机发射、电压的慢上升前沿、较低的电压等因素都可导致非对称高阶模式的产生,并使输出微波功率大大降低。模拟计算结果与文献[6]的实验结果相仿。对解释实验中高阶模出现的原因及抑制方法的选择有一定的参考价值。

致 谢 中物院应用电子学所的范植开、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, Allen K, Baca G, et al. 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**(2):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, Clark M C, Lemke R W, et al. Experimental and theoretical investigations of a magnetically insulated transmission line oscillator (MILO)[C]//Proc of SPIE. 1995, **2557**:50-59.
- [6] 陈代兵,范植开,董志伟,等.阶梯阴极型 L 波段 MILO 的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(5):820-824. (Chen Daibing, Fan Zhikai, Dong Zhiwei, et al. Experimental study on ladder cathode L-band MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(5):820-824)
- [7] 孙会芳,董志伟.磁绝缘线振荡器中高阶模式的三维数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(4):641-644. (Sun Huifang, Dong Zhiwei. 3-D simulation of higher order modes in MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(4):641-644)

Numerical simulation of mode competition in magnetically insulated transmission line oscillator

Sun Huifang, Dong Zhiwei, Yang Yulin

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: The C-band magnetically insulated transmission line oscillator(MILO) has been simulated by the three dimensional PIC code in order to study the influence of non-symmetry excitation mechanisms on its output modes. It is found that the non-symmetry excitation mechanisms, such as random emitting of cathode electron and the long rise time and low magnitude of input voltage, could produce higher order modes and reduce output power. The 3.6 GHz fundamental mode of the designed MILO, and three higher order eigenmodes of 3.7, 4.1, 4.6 GHz were found in the simulation. The results are similar to those obtained by Karat.

Key words: 3-D PIC code; magnetically insulated transmission line oscillator; higher order mode; non-symmetry excitation; mode competition