

文章编号: 1001-4322(2007)11-1861-04

# S 波段磁绝缘线振荡器的数值模拟\*

王 冬<sup>1,2</sup>, 范植开<sup>2</sup>, 陈代兵<sup>2</sup>, 邓景康<sup>1</sup>

(1. 清华大学 物理系, 北京 100084; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 设计了一种阶梯阴极型 S 波段磁绝缘线振荡器, 通过对色散关系的研究, 选择了合理的结构参数。通过对开放腔模型的分析, 得到了磁绝缘线振荡器的谐振频率和有载品质因数。粒子模拟表明, 在外加电压 523 kV、束流 49.7 kA 时, 微波输出功率 4.35 GW, 频率 2.10 GHz, 功率转换效率 16.7%。

**关键词:** 磁绝缘线振荡器; 高频特性; 开放腔

**中图分类号:** TN752.5 **文献标识码:** A

1987 年 R. W. Lemke 和 M. C. Clark 提出了一种新型高功率微波器件——磁绝缘线振荡器(MILO)<sup>[1]</sup>, 绝缘机制使它不需要外加引导磁场, 容易做到小型化和高功率, 具有广泛的应用前景。经过十几年的发展, 在增大提取效率和器件输出功率方面已经取得了重要进展, 在 L 波段获得了功率大于 2 GW, 脉宽 300 ns 的微波输出, 单脉冲能量达 600 J, 能量效率最大可达 7%, 单脉冲比能位于高功率微波器件的首位<sup>[2]</sup>, 成为高功率微波研究领域的热点之一。

从工作的频段划分, 目前对于 MILO 的研究主要集中在 L 波段<sup>[3-8]</sup> 和 C 波段<sup>[9-11]</sup>。在 S 波段, MILO 同样是很具有吸引力的高功率微波源<sup>[2]</sup>, 相关的研究还比较少, 文献[12]中设计了一套以虚阴极为负载的 MILO, 在 450 kV, 45 kA 条件下输出功率 2 GW, 功率转换效率 10%。

本文在阶梯阴极型磁绝缘线振荡器<sup>[8,11]</sup>的研究基础上, 设计了一套高效率的 S 波段 MILO, 该结构保持了负载限制型磁绝缘线振荡器结构紧凑的特点, 同时又将阴极设计成阶梯状结构, 便于在径向调节负载电流。通过高频特性分析, 我们选择了合理的结构参数, 并用 2.5 维全磁粒子模拟软件进行了粒子模拟研究。

## 1 色散关系

S 波段阶梯阴极型 MILO 结构如图 1 所示。器件采用 6 个叶片, 第 1, 2 片为扼流片, 内外半径分别为 7.8 cm 和 11.2 cm; 第 3 至第 5 片为主慢波叶片, 内外半径分别为 8.3 cm 和 11.2 cm; 第 6 片为提取叶片, 内外半径分别为 9.2 cm 和 11.2 cm; 叶片厚度 0.5 cm, 间隔 2.2 cm。阳极收集筒内外半径分别为 6.6 cm 和 7.0 cm。阴极各段半径(从左至右)分别为 3.4, 5.6 和 4.5 cm, 其中后两段为电流发射区。

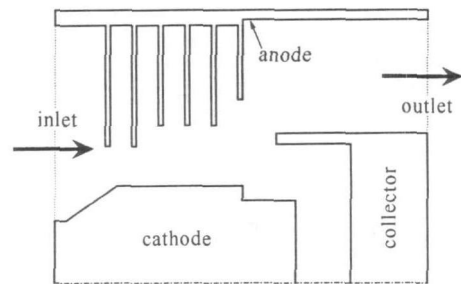


Fig. 1 Schematic of ladder cathode MILO  
图 1 阶梯阴极型 MILO

MILO 中主慢波结构为同轴盘荷波导, 研究无限长周期性结构中角向对称的 TM 模, 其色散方程为<sup>[13]</sup>

$$\frac{G_0(r_c, r_{ai})}{n G_0(r_c, r_{ai})} \frac{d}{p} [\text{sinc}(\frac{-nd}{2})]^2 = \frac{F_1(r_{ao}, r_{ai})}{k F_0(r_{ao}, r_{ai})} \quad (1)$$

式中:  $r_c, r_{ai}, r_{ao}, d, p$  分别表示阴极半径, 阳极叶片内、外半径, 叶片间距及慢波结构周期;  $n = 0 + 2n / p, 0$  为相移常数;  $F_0, G_0, F_1, G_1$  分别为

$$F_0(r_{ao}, r_{ai}) = N_0(kr_{ao})J_0(kr_{ai}) - J_0(kr_{ao})N_0(kr_{ai}) \quad (2)$$

$$G_0(r_c, r_{ai}) = K_0(nrc)I_0(nr_{ai}) - I_0(nrc)K_0(nr_{ai}) \quad (3)$$

$$F_1(r_{ao}, r_{ai}) = N_0(kr_{ao})J_1(kr_{ai}) - J_0(kr_{ao})N_1(kr_{ai}) \quad (4)$$

$$G_1(r_c, r_{ai}) = K_0(nrc)I_1(nr_{ai}) + I_0(nrc)K_1(nr_{ai}) \quad (5)$$

\* 收稿日期: 2007-01-18; 修订日期: 2007-06-18

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 王 冬(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率微波技术的研究; w-d04@mails.tsinghua.edu.cn.

式中： $\beta_n^2 = \beta_n^2 - (\omega/c)^2$ ； $I_0, I_1, K_0, K_1$  分别为第 1 类和第 2 类虚宗量 Bessel 函数； $J_0, J_1, N_0, N_1$  分别为第 1 类和第 2 类 Bessel 函数。

根据式(1)求解慢波结构色散关系,结果如图 2(a)所示。从图上可见,MILO 的正常工作模式  $TM_{00}$  模上截止频率为 2.17 GHz,第一个轴对称高阶模  $TM_{01}$  模下截止频率为 2.64 GHz,模式间隔较大,可以保证 MILO 的单模工作。图 2(b)为  $r_{in}$  分别取 7.8 cm 和 8.3 cm 时  $TM_{00}$  模的色散关系,MILO 为  $TM_{00}$  模或近  $TM_{00}$  模工作器件,当相邻谐振腔之间相移为  $\pi$  时,两条色散曲线之间频率间隔为 230 MHz,表明在所选结构参数下,扼流片可以阻止微波功率的反向传输,增强主慢波结构区的束-波相互作用。

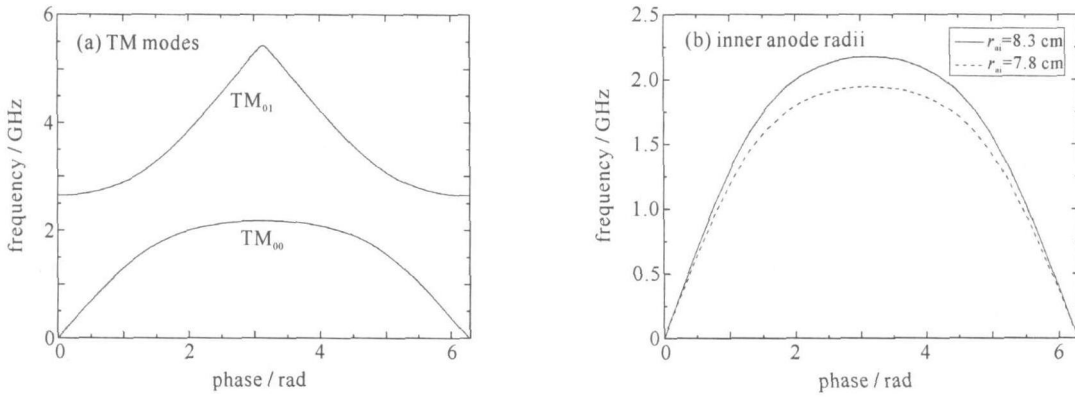


Fig. 2 Dispersion curves of TM modes and inner anode radii

图 2 TM 模和不同叶片内半径下的色散关系

## 2 开放腔高频特性

与无限长周期性结构有所不同,MILO 实际结构是两端为波导边界条件的开放式谐振腔(图 1)。在谐振腔中引入一个宽频激励函数<sup>[14]</sup>,得到开放腔的高频响应如图 3(a)所示。从图中可见,第一个谐振频率为 2.10 GHz,结合图 2(a)中色散关系的计算可知这是 MILO 工作频率。图 3(b)为该频率下典型电场分布,相邻谐振腔之间相位差为  $\pi$ ,与 MILO 工作模式相符。

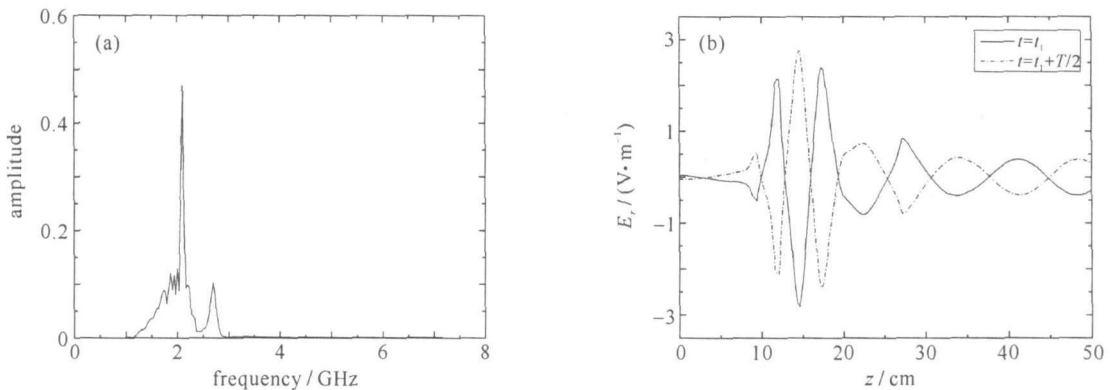


Fig. 3 Frequency response and radial electric field vs z of MILO in open cavity

图 3 MILO 开放腔频率响应和开放腔内径向电场随纵向距离的变化

微波模式的激励与其品质因数相关, $Q$  值越大,越容易起振,但是  $Q$  值太大不利于功率提取。MILO 中既要保证器件的起振,又希望提高器件的转换效率,所以工作模式的  $Q$  值不能太大。

按照谐振腔内品质因数的定义<sup>[15]</sup>,可以将有载品质因数表示为

$$Q_L = \frac{W_m}{P_m / \omega} \tag{6}$$

即  $Q_L$  为谐振腔的总储能与谐振腔内场的相位变化 1 rad 的平均耗能的比值。式中： $\omega$  为第  $m$  个模式的固有频率； $W_m$  为谐振腔内第  $m$  个模式的总储能； $P_m$  为谐振腔内第  $m$  个模式的功率损耗,它包含腔壁损耗、腔内介质损耗以及由波导边界处的功率提取导致的谐振腔能量损耗。由能量守恒定律,开放腔中能量平衡关系式可以表示为

$$W = W_{in} + (-W_{out}) + W_0 \tag{7}$$

即谐振腔内任意时刻的能量等于该时刻以前进入谐振腔的能量、离开谐振腔的能量以及初始时刻谐振腔内能

量的总和。研究  $W_{in}$  为零的损耗系统,则有  $P_m = -dW_m/dt$ ,代入式(6)可得

$$\frac{-2 f_m dt}{Q_L} = \frac{dW_m}{W_m} \tag{8}$$

在  $t_1 \sim t_2$  范围内对式(8)积分可得

$$Q_L = \frac{-2 f_m (t_2 - t_1)}{\ln[W_m(t_2)/W_m(t_1)]} \tag{9}$$

式中: $f_m$  为第  $m$  个模式的固有频率,为已知量。根据式(9)求出 MILO 有载品质因数为 119。

### 3 粒子模拟

用 2.5 维全电磁粒子模拟软件对 MILO 进行模拟研究。在器件入口处输入 TEM 波,电压波形采用上升时间为 1 ns 的理想电压波形,电流采用自洽发射模型,在强电场的作用下,电子从阴极的侧面发射。打到收集极上的电子通过支撑杆流向阳极,形成磁绝缘电流。该电流产生一个与径向电场正交的角向磁场,慢波结构(SWS)区的电子在正交的电磁场( $E_r, B$ )作用下沿轴向漂移。当电子束速度与慢波结构中  $TM_{00}$  模相速度接近时形成谐振,电子束能量转化为微波能量,产生高功率微波。

在输入电压 523 kV,电流 49.7 kA,功率 26 GW 时模拟结果如图 4~7 所示。图 4 为饱和工作时电子相空间图,在强微波场的调制下,电子束形成电子轮辐。其中,向提取间隙喷射的电子也形成一个轮辐,有利于提高束-波相互作用效率。图 5 和图 6 分别为微波输出口处径向电场分量及其频谱,从图上可见 MILO 工作频率为 2.10 GHz,与开放腔计算相符,器件在 5 ns 时起振,12 ns 时达到饱和。图 7 为微波输出口处通过对坡印廷矢量进行面积分得到的微波功率随时间变化图,饱和时平均功率为 4.35 GW,功率转换效率为 16.7%。

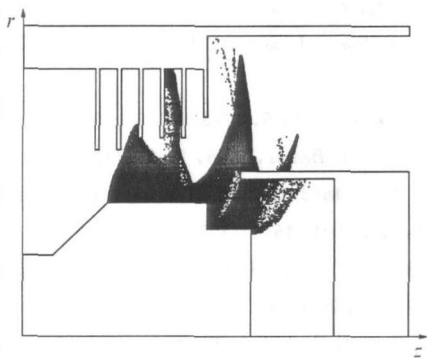


Fig. 4 Phase space distribution of electrons at saturation

图 4 饱和工作时电子相空间分布图

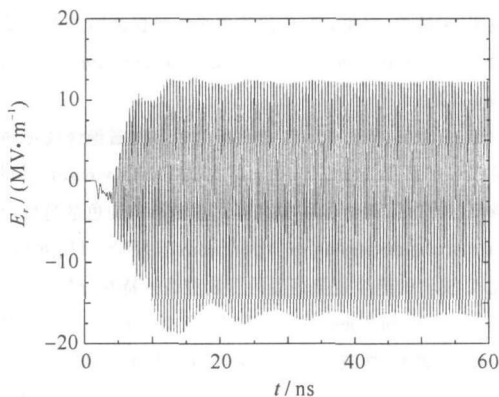


Fig. 5 Output electric field vs time

图 5 微波输出口处径向电场随时间变化图

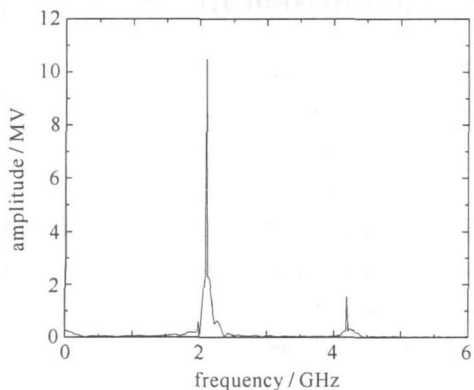


Fig. 6 Spectrum of output microwave

图 6 输出微波频谱

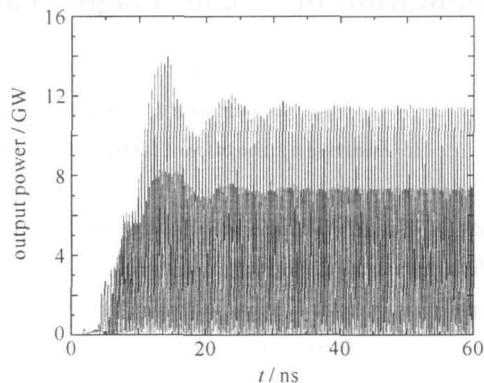


Fig. 7 Output power vs time

图 7 输出功率随时间变化图

### 4 结 论

本文设计了一种阶梯阴极型 S 波段磁绝缘线振荡器,通过对其色散关系的研究,选择了合理的结构参数。由于 MILO 实际结构与求解色散关系所用的周期性结构有一定差别,我们建立了 MILO 的开放腔模型。通过对开放腔模型的分析,得到了 MILO 的谐振频率和有载品质因数。2.5 维粒子模拟表明,在外加电压 523 kV、

束流 49.7 kA 时,微波输出功率 4.35 GW,频率 2.10 GHz,功率转换效率 16.7%,微波频率单一,模式稳定。

### 参考文献:

- [1] Lemke R W, Clark M C. Theory and simulation of high power microwave generation in a magnetically insulated transmission line oscillator [J]. *J App Phys*, 1987, **62**(8):3436-3440.
- [2] Barker R J, Schamiloglu E. 高功率微波源与技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2001. (Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies. Beijing: Tsinghua University Press, 2001)
- [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] Haworth M D, Englert T J, Hendricks K J, et al. Comprehensive diagnostic suite for a magnetically insulated transmission line oscillator [J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, **71**(3):1539-1547.
- [5] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**(3):698-713.
- [6] Ashby D E T F, Eastwood J W, Allen J, et al. Comparison between experiment and computer modeling for simple MILO configurations[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1995, **23**(6):959-969.
- [7] 樊玉伟. 紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2003. (Fan Y W. Investigation of a compact L-band magnetically insulated transmission line oscillator. Changsha: National University of Defense Technology, 2003)
- [8] Chen D B, Fan Z K, Dong Z W, et al. Experimental researches on ladder cathode MILO[C]// Proc of EAPPC. 2006.
- [9] 张晓萍. 新型磁绝缘线振荡器的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004. (Zhang X P. Study on a novel magnetically insulated transmission line oscillator. Changsha: National University of Defense Technology, 2004)
- [10] 郭炎华. C 波段磁绝缘线振荡器的理论与实验研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2005. (Guo Y H. Theoretical and experimental investigations of C-band magnetically insulated transmission line oscillator. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005)
- [11] 张晓萍, 钟辉煌, 舒挺, 等. C 波段磁绝缘线振荡器的理论设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(8):1129-1132. (Zhang X P, Zhong H H, Shu T, et al. Theoretical design and experimental studies of C band MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(8):1129-1132)
- [12] 孙会芳, 董志伟, 周海京, 等. 虚阴极为负载的磁绝缘线振荡器设计和研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(8):1126-1128. (Sun H F, Dong Z W, Zhou H J, et al. Design of MILO with vircator load. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(8):1126-1128)
- [13] 张晓萍, 钟辉煌. 磁绝缘线振荡器同轴慢波结构色散特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(3):363-366. (Zhang X P, Zhong H H. Analysis of the dispersion on MILO coaxial SWS. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(3):363-366)
- [14] 何琥. C 波段磁绝缘线振荡器的开放腔高频特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(1):101-104. (He H. Analysis of the high frequency characteristics of open cavity of MILO of C-band. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1):101-104)
- [15] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京:电子工业出版社, 1994. (Zhang K Q, Li D J. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994)

## Simulation of S band magnetically insulated transmission line oscillator

WANG Dong<sup>1,2</sup>, FAN Zhi-kai<sup>2</sup>, CHEN Dai-bing<sup>2</sup>, DENG Jing-kang<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A ladder cathode S band magnetically insulated transmission line oscillator(MILO) that operates at 2.10 GHz is designed. Proper structure parameters are chosen based on the discussion of dispersion characteristics. The resonant frequency and loaded quality factor are obtained through numerical calculation of the open cavity model of MILO. An output power of 4.35 GW is generated in 2.5 D particle simulation when the input voltage is 523 kV and input current is 49.7 kA. The power efficiency is 16.7%.

**Key words:** Magnetically insulated transmission line oscillator; High frequency characteristics; Open cavity