

文章编号: 1001-4322(2005)08-1129-04

C 波段磁绝缘线振荡器的理论设计与实验*

张晓萍, 钟辉煌, 舒挺, 袁成卫, 王勇, 赵延宋, 罗玲

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 通过理论分析与计算,设计加工了一个 C 波段磁绝缘线振荡器(MILO),并进行了实验研究。在二极管电压为 437~464 kV、二极管电流为 36~39 kA 的条件下,从实验上获得了功率为 1.60~1.68 GW、频率为 3.60~3.66 GHz、脉宽为 33~38 ns 的 TEM 模高功率微波辐射,功率转换效率大于 9%。

关键词: 磁绝缘线振荡器; 高功率微波; PIC 方法

中图分类号: TN752.5 文献标识码: A

自 1987 年 R. W. Lemke 和 M. C. Clark 提出磁绝缘线振荡器(MILO)^[1]的概念以来,经过十几年的研究,L 波段 MILO^[2~4]在实验上已获得了约 2 GW 的微波输出功率。迄今为止,关于 C 波段 MILO 的研究基本上都是理论分析和数值模拟方面的^[5~10],国内外尚无实验研究的正式报道。本文经过深入的理论研究和数值模拟,设计加工并基于 SPARK-03 加速器进行了 C 波段 MILO 实验。

1 装置的理论设计

1.1 主慢波结构(SWS)区的设计

由于 C 波段 MILO 体积小,阴阳极间距相应也小,在数百 kV 外加电压下,如何避免电击穿,是研究重点之一。通过对同轴慢波结构的色散特性分析^[8,11]以及对 MILO 中磁绝缘机制的深入研究^[9,11],在合理选择慢波结构参数的基础上,适当拉大阴阳极间距,成功避免了电场击穿。因而,在电压平顶 40 ns 下,输出微波半高宽超过 32 ns,最宽达 38 ns,未发现脉冲缩短问题。

1.2 负载二极管的设计

传统 L 波段 MILO^[4]中,负载二极管区的阴极杆半径与主 SWS 区阴极杆半径相等,而阳极收集筒内半径与主 SWS 区叶片内半径相等,外半径与提取叶片内半径相等。这种结构的缺点是阴极杆深入收集筒的长度必须很长才能提供足够的磁绝缘电流,不利于装置的小型化。我们设计的负载二极管,将其阴极杆与阳极收集筒在径向同时缩小,只要负载二极管径向尺寸选择合理,阴极杆深入收集筒长度不需很长,就可提供足够的磁绝缘电流。具体结构参见图 1。

采用压缩型负载二极管方式的作用:(1)有效减小阴极杆深入收集筒长度,使装置更紧凑;(2)使负载二极管的部分电子向其上方空间喷射,与提取叶片下的电子共同形成第三个电子群聚轮辐(图 2),参与束波相互作用,相当于部分负载电流被用来产生微波,从而提高了微波产生功率;(3)使提取叶片和阳极筒间距增大,也使微波提取腔空间变大,避免提取间隙射频击穿,提高了微波输出功率。



Fig. 1 Schematic of C-band MILO

图 1 C 波段 MILO 结构示意图

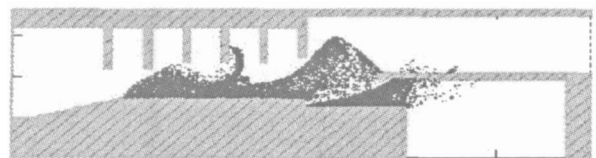


Fig. 2 Electron bunching in C-band MILO

图 2 C 波段 MILO 电子群聚图

1.3 微波同轴提取区的设计

如果按照 1.2 节所述传统 MILO 的结构设计,则在 C 波段 MILO 情况下,微波同轴提取部分将很小,在微波输出功率达 GW 量级时,射频击穿可能性变大,不利用微波输出。为此,在设计 C 波段 MILO 装置时,采用了扩大微波同轴提取区结构的技术,即压缩阳极收集筒径向尺寸和增大阳极外筒尺寸。实验中,阳极收集筒必

* 收稿日期:2005-01-13; 修订日期:2005-05-16

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:张晓萍(1975—),女,讲师,博士,主要从事高功率微波方面的研究;E-mail:plinafly@163.com。

须与阳极外筒通过导体支撑杆相连,以便使收集到的负载电流流向阳极外筒,从而保持阳极收集筒与阳极外筒的电势一致。而处于微波提取区的支撑杆,将引起微波的反射,并可能激励起杂散模式。通过理论分析和计算,我们设计了单排具有简单结构的支撑杆^[10,11]。这种导体支撑杆即可起到支撑和导流的作用,又可避免在同轴提取区的两端引起高阶模式,绝大部分微波能量透过支撑杆仍以 TEM 波形式传播。

2 典型模拟结果

根据上面的设计结果进行粒子模拟的结果如图 3、图 4 所示。在工作电压 458.3 kV,电流 36.2 kA 下,饱和后平均输出功率为 1.84 GW,工作主频 $f_0 = 3.6$ GHz,饱和后的平均效率为 $\eta = 11\%$ 。由图 3 可见,7 ns 时微波输出功率就已饱和。微波主频为 3.6 GHz,且单频性很好(图 4)。

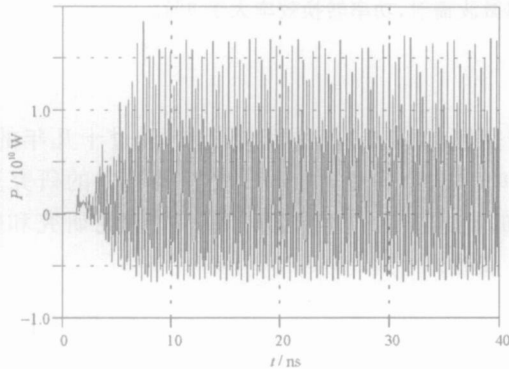


Fig. 3 Output power vs time
图 3 微波输出功率随时间变化图

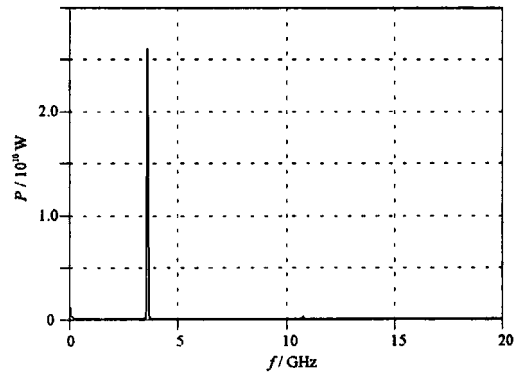


Fig. 4 Power spectrum of the microwave
图 4 微波的功率谱

3 实验研究

对加工后的 C 波段 MILO 器件进行了实验研究。实验重复多炮,在二极管电压 437 ~ 464 kV、二极管电流 36 ~ 39 kA 下,获得了频率约 3.60 GHz、功率约 1.68 GW 的 TEM 模高功率微波辐射,微波辐射脉宽为 33 ~ 38 ns(电压平顶 40 ns)。实验结果和模拟结果吻合良好。我们取其中一炮进行分析。

3.1 微波频率的测量

采用混频法和色散线法同时对 C 波段 MILO 的微波频率进行测量。用色散线法测量时,微波频率

$$f = f_c / \sqrt{1 - [L / (c t)]^2} \tag{1}$$

式中: $f_c = 3.152$ GHz 为所用 C 波段色散线的截止频率; $L = 22.24$ m 为色散线长度; c 为光速, t 为经过定向耦合器后直接输出的一路信号与经过长 L 的色散线波导输出的另一路信号之间的延时,体现在示波器上为频率波形中两个峰的时间差。用色散线法测量频率的波形见图 5 中通道 1,从图中可知 $t = 144$ ns,代入(1)式可得 $f = 3.68$ GHz。

C 波段 MILO 实验中,微波频率的混频法测量是采用我们实验室自行研制的 CY0401 型高功率微波频率

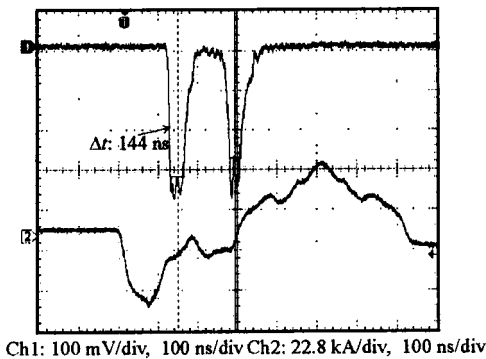


Fig. 5 Beam current (Ch2) and waveform from dispersive wave-guide (Ch1)

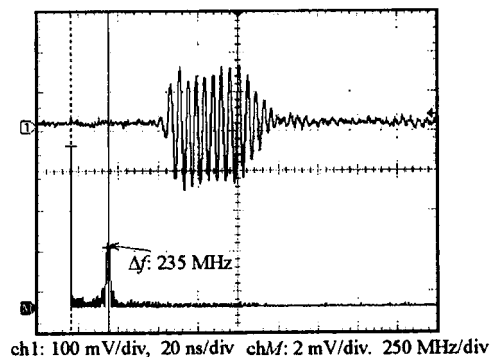


Fig. 6 Mixing signal (Ch1) and its spectrum (ChM)

测量仪进行的,结果见图 6。混频时采用的本振频率为 3.9 GHz,由差频信号的频谱图可得差频信号的主频为

235 MHz,故待测微波的主频为 $3.9 \text{ GHz} - 0.235 \text{ GHz} = 3.665 \text{ GHz}$ 。

由于色散线法测量结果有较大误差,本文以混频法测量结果为准,此炮输出微波主频约为 3.66 GHz 。多炮重复测量,频率范围为 $3.60 \sim 3.66 \text{ GHz}$,且稳定性很好。

3.2 微波模式的测量

实验中,采用远场测量方法^[12]来确定器件辐射的微波功率并由测量的辐射场功率密度分布来分析器件输出微波的模式。具体来说,在测量辐射微波的模式时,需同时用两个微波接收喇叭,将其中一个固定不动,另一个则依次在不同方向测量点移动,每炮测一个点,并将测得的值用固定喇叭测量值归一化,即可得器件的辐射方向图。

C 波段 MILO 的辐射方向图如图 7 所示,图中的理论曲线是在 $f = 3.63 \text{ GHz}$ 时对同轴输出口 TEM 模辐射方向图的计算结果。从图中可以看出实验测试和理论计算的辐射方向图基本一致,因此判定 C 波段 MILO 输出微波的主模为 TEM 模。

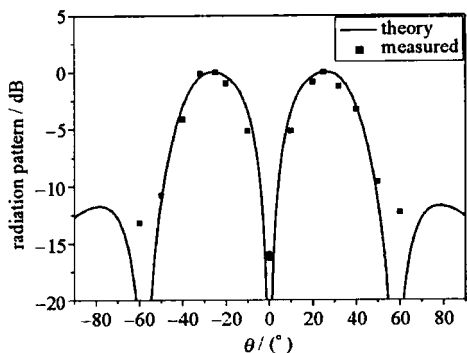


Fig. 7 Distribution of power density
图 7 功率密度分布图

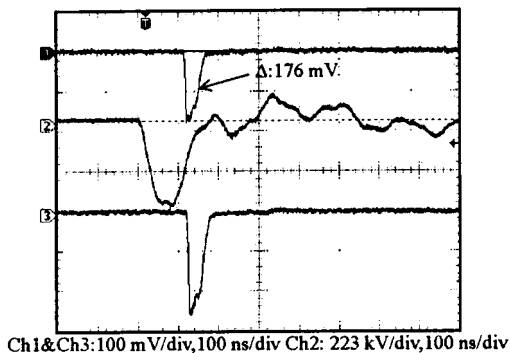


Fig. 8 Diode voltage (Ch2) and microwave power (Ch1 & Ch3)
图 8 二极管电压和微波功率波形

3.3 微波功率的测量

在测量辐射微波的功率时,将一个 5 cm 标准矩形波导同轴转换头(即 BJ48 口面天线)作为微波接收喇叭,置于最大辐射方向上、距微波辐射口 5 m 的位置,其所获取的微波信号经过衰减器组、晶体检波器及同轴信号线送入数字示波器,利用示波器上读得的检波信号的幅值 V_m (单位为 mV) 即可得出微波接收喇叭所接收到的微波功率,从而得到 MILO 器件所辐射的微波总功率

$$P_t = 10^{-12 + A + A + (V_m)/K/10} \quad (2)$$

式中: P_t 的单位为 GW , K 为经标定得到的晶体检波器的灵敏度, $= 1.06$ 为检波信号经过信号线的衰减系数, $A = 62.5 \text{ dB}$ 是标定出的固定衰减器的衰减量。是一个特定系统(由 MILO、微波输出口到喇叭口之间的空气、接收喇叭组成)的衰减量(单位为 dB),是由标定和实验数据经过计算^[12]得到的。根据图 7 中的实验测量数据,通过插值的方法^[12]可以计算出 C 波段 MILO 辐射方向性系数 $D_E = 6.31$,而经标定所用微波接收喇叭在 3.63 GHz 时,增益为 5.1 dB ,进而求出 5 m 最大辐射方向上的空间衰减 $= 44.52 \text{ dB}$ 。

C 波段 MILO 的典型检波信号波形如图 8 中通道 1 所示。从图中可知,微波信号幅值 $V_m = 176 \text{ mV}$,则由所用检波晶体标定曲线上查出对应的输入功率为 $V_m/K = 15.09 \text{ dB} \cdot \text{m}$,再由式(2)可得输出微波功率 $P_t = 1.63 \text{ GW}$ 。图 8 中通道 3 是相同距离对称角度上测量得到的检波信号波形,这一路所用衰减器比通道 1 一路中的衰减量小,计算表明本器件输出微波场的对称性很好。另外本器件输出微波具有较宽脉宽,由图 8 可知,在二极管电压平顶约 40 ns 情况下,微波辐射脉宽(半高宽)达 34 ns ,未发现脉冲缩短问题。

表 1 C 波段 MILO 装置的典型实验测试结果

Table 1 Typical experimental results of the C-band MILO

	U/kV	I/kA	P_{in}/GW	\bar{P}_{out}/GW	$\eta/\%$	FWHM/ns	f/GHz
1	437	36	15.7	1.60	10.2	38	3.62
2	462	38	17.6	1.68	9.5	33	3.63
3	464	39	18.1	1.63	9.0	34	3.66

实验中对应的二极管电压如图 8 中通道 2 所示,二极管电流如图 5 中通道 2 所示。对应的二极管电压为

464 kV, 二极管电流为 39 kA。输入的电功率为 18.1 GW, 相应的微波功率转换效率为 9%。表 1 给出了 C 波段 MILO 装置的几炮典型实验测试结果。

4 结 论

MILO 是高功率微波研究领域的热点之一。由于 C 波段 MILO 工作频率高、体积小, 易发生电场击穿, 且工作模式不易控制, 因而国外未见对 C 波段 MILO 的研究报导, 国内的研究也进展不快。本文针对这两个主要问题, 在模拟优化的基础上, 结合本研究室加速器的运行参数, 设计了一个 C 波段 MILO。首次在实验中得到了基于 MILO 机制的 C 波段 1.68 GW 的微波辐射, 功率转换效率大于 9%。实验结果和模拟结果吻合得较好。

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] Calico S E, Clark M C, Lemke R W, et al. Experimental and theoretical investigations of a magnetically insulated line oscillator(MILO) [A]. Proc of SPIE[C]. 1995, **2557**:50—59.
- [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—374.
- [4] Haworth M, Allen K, Baca G, et al. Recent progress in the hard-tube MILO experiment[A]. Proc of SPIE[C]. 1997, **3158**:28—39.
- [5] 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. Tapered C-band magnetically insulated line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1):93—96)
- [6] 杨郁林, 丁武. 高频大功率磁绝缘线振荡器的理论设计[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(1):76—78. (Yang Y L, Ding W. Design consideration of high power high frequency MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1):76—78)
- [7] 张晓萍, 钟辉煌, 张建德, 等. 利用负载电流产生微波的新型 MILO[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(1):80—84. (Zhang X P, Zhong H H, Zhang J D, et al. A New Type of MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1):80—84)
- [8] 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)
- [9] 张晓萍, 钟辉煌, 舒挺, 等. 一种改进型 C 波段磁绝缘线振荡器的数值模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(4):485—488. (Zhang X P, Zhong H H, Shu T, et al. Research of an improved C-band MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(4):485—488)
- [10] 张晓萍, 钟辉煌, 袁成卫. 微波源中同轴提取区支撑杆的理论分析与设计[J]. 微波学报, 2004, **20**(2):46—50. (Zhang X P, Zhong H H, Yuan C W. Theoretical analysis and design of the support posts in coaxial extractor of microwave source. *Journal of Microwaves*, 2004, **20**(2):46—50)
- [11] 张晓萍. 新型磁绝缘线振荡器的研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2004. (Zhang X P. Study on a novel magnetically insulated transmission line oscillator. Changsha:National University of Defense Technology, 2004)
- [12] 舒挺, 王勇, 李继健, 等. 高功率微波的远场测量[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5):485—488. (Shu T, Wang Y, Li J J, et al. Measurement of high power microwaves in the far-field zones. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5):485—488)

Theoretical design and experimental studies of C-band MILO

ZHANG Xiao-ping, ZHONG Hui-huang, SHU Ting, YUAN Cheng-wei,

WANG Yong, ZHAO Yan-song, LUO Ling

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

Abstract: A C-band magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) has been designed, manufactured and tested. The C-band MILO typically operates in single-shot mode with 437 ~ 464 kV, 36 ~ 39 kA beam pulses, generating 1.60 ~ 1.68 GW high power microwave pulses at 3.60 ~ 3.66 GHz. The output powers radiate through the extractor coax, where they propagate in the TEM mode. The power conversion efficiency is greater than 9% in experiments. The experimental results agree well with the simulations.

Key words: MILO; High-power microwave; PIC method