

文章编号: 100124322(2004)1121453204

紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的实验研究^x

樊玉伟^{1,2}, 舒挺¹, 王勇¹, 李志强¹, 周津娟¹, 赵延宋¹

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073;2. 防空兵指挥学院,河南 郑州 450052)

摘 要: 设计加工了一个紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器(MILO)并进行了实验研究。该 MILO 具有一个新型收集极和一个新型模式转换器,射频扼流腔减为一个,同时将阴极杆设计成变阻抗结构,该 MILO 由一台自建的 600kV,8 ,100ns 加速器 SPARK201 驱动。在二极管电压为 515~538kV,二极管电流为 58~61kA 的条件下,该 MILO 在实验中获得了 1.76~1.78GHz,2.2~2.5GW 的 TM_{01} 模高功率微波辐射,功率转换效率为 7.3%~7.9%。在 30ns 的有效电压脉宽下,实验中测得微波脉冲半高宽为 15ns。实验结果与模拟结果符合得较好。

关键词: 磁绝缘线振荡器; 慢波结构; 高功率微波

中图分类号: TN753.4 **文献标识码:** A

磁绝缘线振荡器(MILO)是高功率微波研究领域的热点之一^[1~7]。国外已在实验中获得了 2GW 的高功率微波辐射^[8,9]。国内目前主要集中于理论研究,实验研究较少,实验中测到的辐射功率还在百 MW 量级^[10]。本文对本课题组设计加工的紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器进行了实验研究。

1 器件结构

器件结构如图 1 所示。

磁绝缘线振荡器产生高功率微波的物理机制是:在输入端加上适当的高电压(一般为几百 kV),电子从阴极侧面和端头发射。伸入收集极的部分阴极杆径向和轴向发射的电子由收集极回收,这部分电子束流称为负载电流,其功能是产生一个环绕阴极杆的角向磁场,对慢波结构下的阴极杆侧面发射的电子束流起磁绝缘作用,因此又称为磁绝缘电流。在阴阳极间的径向电场 E 和角向磁场 B 的共同作用下,慢波结构下的阴极杆侧向发射的电子沿 z 轴向右作 $E \times B$ 漂移,漂移过程中,电子束流与阳极慢波结构所决定的微波场相互作用。当这部分电子的漂移速度稍大于微波场的相速度时,电子的动能转换为微波场的能量,在适当的结构参数条件下将激励高功率微波。

本器件的阴极杆设计为变阻抗结构。磁绝缘线振荡器的扼流片通常设计为 3 片,在保证扼流效果的前提下,本器件设计时首次采用 2 个扼流片,即比常见的磁绝缘线振荡器少一个扼流腔,使器件紧凑化。本器件的收集极设计时综合了硬管 MILO 和渐变型 MILO 的优点,首次将收集极设计成带有收集板的收集筒结构。伸入收集筒的阴极杆径向和轴向共同发射电子形成磁绝缘电流,这种设计方式可以有效地减小阴极杆伸入收集筒的长度,从而有效地减小装置的整体尺寸,使器件更加紧凑化。支撑杆一方面为收集极电流提供回流通道,另一方面对收集极和模式转换器起支撑作用。模式转换器设计成圆台型,将同轴区提取的 TEM 模微波转换成 TM_{01} 模。详细设计思想参见文献[11]。

2 微波频率

模拟中得到的微波频率为 1.75GHz,如图 2 所示。

实验中,微波频率可用 IDS7154 示波器测量得到,测量中得到的波形如图 3 所示。图中测量波形对应 10

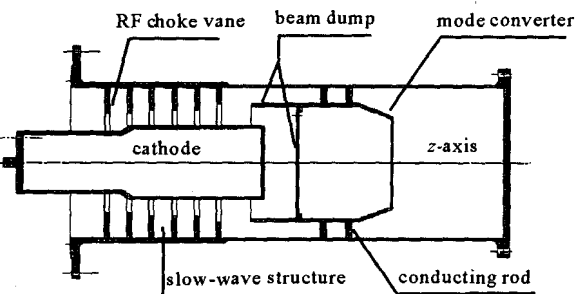


Fig. 1 Configuration of the investigated MILO

图 1 MILO 结构示意图

^x 收稿日期:2004204207; 修订日期:2004208204

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:樊玉伟(1972—),男,硕士,从事高功率微波研究;E2mail:9108212@sohu.com。

个周期,时间间隔为 5.68ns,由此可知,微波频率为 1.76GHz。与模拟中得到的微波频率相差仅为 0.01GHz,相对误差为 0.6%。实验结果与模拟结果符合得很好。

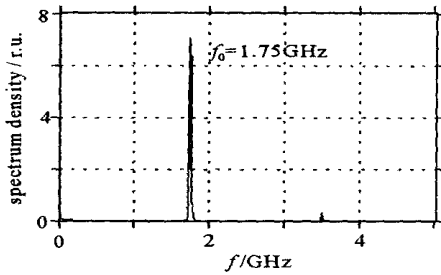


Fig. 2 Power spectrum of the microwaves

图 2 微波的功率谱

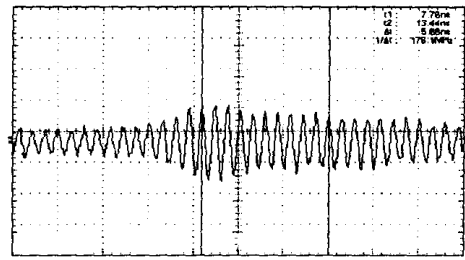


Fig. 3 Waveform for frequency measurement

图 3 频率测量得到的波形

3 微波模式

微波模式直接测量比较困难,但是可以通过测定辐射功率的角向分布来判断微波的模式。在实验测量中可能存在着不确定因素,比如每次束流参数会有些变化,排除个别变化较大的参数,从这些实验数据中可以得到微波辐射功率角向分布的规律。测量所得数据如表 1 所示。表中数据为多炮重复实验的平均结果。表中,为测量微波辐射的角度,0 在轴线上, P 为功率密度(相对值)。

表 1 模式测量数据

Table 1 Data of mode measurement

$\theta / (^\circ)$	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
P/dB	11.83	13.53	14.50	13.78	12.13	2.82	11.83	13.19	14.65	13.83	12.59	9.81	7.22	3.52

根据表 1 的数据可作出实验测量与 TM_{01} 模式理论计算的比较图,如图 4 所示。从图中可见,实际测量结果与理论计算符合得较好。但在 $\pm 10^\circ$ 处,实验测量值稍大于理论计算值。初步分析可能是倍频所致,因为在模拟结果中也出现了倍频。1.76GHz 的倍频为 3.52GHz,根据理论计算,这一频率微波从所设计的圆波导中辐射出来时其 TM_{01} 模式的最大辐射方向为 $\pm 15^\circ$ 。叠加的结果是:微波辐射功率的实测值在 $\pm 15^\circ$ 附近稍大于理论计算值,正如图 4 中所示,分析正确与否,尚待进一步研究。从图中不难看出,所测的微波辐射为 TM_{01} 模式,最大辐射方向为 $\pm 30^\circ$,与该频率下的理论计算结果符合得很好。

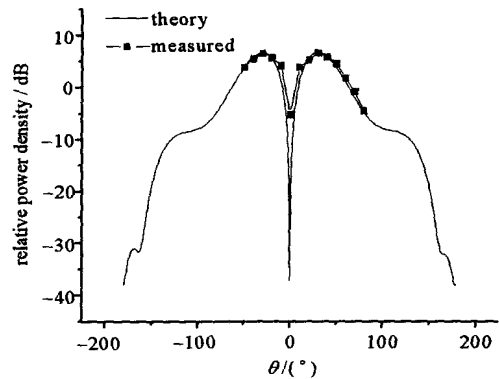


Fig. 4 Mode comparison between theory and measurement

图 4 微波模式实验测量与理论计算比较

4 微波功率

在实验测量中,远场条件为^[12]

$$L > 2D^2/\lambda \tag{1}$$

式中: L 为微波辐射口至微波测量喇叭之间的距离; λ 为微波波长; D 可取为微波辐射口面与测量喇叭口面最大尺寸之和。本实验中 $D = 0.4m$, $\lambda = 0.17m$,要求 $L > 1.9m$,实验中取 $L = 6.0m$,满足远场条件。

在远场测量的条件下,微波源的辐射功率为^[13]

$$P_{out} = (4 L^2 / D_E) (P_{hm} / S_{eff}) \tag{2}$$

式中: P_{out} 为微波源辐射功率; P_{hm} 为测量喇叭在微波源最大辐射方向测得的微波功率; S_{eff} 为测量喇叭在该频率下的有效面积,本实验中测量喇叭的标定增益为 8.8dB,对应的有效面积为 $170cm^2$; D_E 为微波源 E 面辐射方向性系数,可由下式得到

$$D_E = 2 / \int_0^\pi [P_h(\theta) / P_{hm}] \sin \theta d\theta \tag{3}$$

$P_h(\theta)$ 为测量喇叭在任意 θ 方向测得的微波功率,并已考虑到任意 θ 方向的辐射

$$(\) = P_h(\) / S_{\text{eff}} \tag{4}$$

令
$$= 4 L^2 / (D_E S_{\text{eff}}) = 10^{P_0/10} \tag{5}$$

则
$$P_0 = 10 \lg \tag{6}$$

式中: P_0 可看作是微波测量喇叭在最大辐射方向测得的微波功率占微波源辐射总功率的份额所对应的分贝值。根据上面所测得的数据,通过插值的方法可以得到任意方向上的 $P_h(\)$,并由(4)式得出辐射方向图,从而按(3)式计算出 D_E ,进而求出 P_0 。利用计算程序按(3)式计算出 $D_E = 4.82$, $P_0 = 37.4\text{dB}$ 。

根据(2)、(5)和(6)式,微波辐射功率可表示为

$$P_{\text{out}} = (4 L^2 / D_E) (P_{\text{hm}} / S_{\text{eff}}) = P_{\text{hm}} = 10^{P_0/10} P_{\text{hm}} \tag{7}$$

式中: P_{hm} 可表示为

$$P_{\text{hm}} = 10^{\frac{A + P_{\text{dBm}}}{10} - 12} \tag{8}$$

P_{hm} 单位为 GW, P_{dBm} 项为检波器输出电压所对应的输入功率,以 dBmW 为单位, A 为固定衰减器的衰减量,本实验中固定衰减器在 1.76GHz 的标定值为 $A = 67.5\text{dB}$ 。

实验重复多炮,典型实验结果见表 2。表中, V 为二极管电压, I 为二极管电流, V_m 为示波器测得的检波器的输出电压, P_{out} 为微波辐射的功率, f_0 为所辐射微波的频率, η 为相应的功率转换效率。

表 2 典型实验结果

Table 2 Typical experimental results

V/ kV	I/ kA	V_m / mV	P_{dBm} / dBm	P_{out} / GW	f_0 / GHz	η / %
515	58	272	18.50	2.2	1.76	7.3
515	58	282	18.83	2.4	1.77	7.9
526	61	286	18.97	2.4	1.78	7.6
538	60	288	19.20	2.4	1.76	7.6
538	61	292	19.16	2.5	1.77	7.8

取其中一炮的具体结果如下。图 5 是实验中利用 TDS3054B 示波器在功率测量中测得的波形。曲线 1 为二极管电压波形,对应的二极管电压为 538kV。曲线 2 为二极管电流波形,对应的二极管电流为 61kA。曲线 3 和曲线 4 分别为 32° (最大辐射方向)和 70° 辐射方向测得的微波包络。曲线 3 对应的微波幅值为 292mV,所用的同轴电缆线的衰减量 $\alpha = 1.06$,从检波器标定曲线上查出对应的输入功率 $P_{\text{dBm}} = 19.16\text{dBm}$,由(7)和(8)两式可得微波源辐射功率为

$$P_{\text{out}} = 10^{((P_0 + A + P_{\text{dBm}}) / 10) - 12} = 2.5 (\text{GW}) \tag{9}$$

该炮输入的电功率为 32.8GW,相应的微波功率转换效率为 7.8%。

图 5 中微波脉冲半高宽为 15ns,脉宽较窄。这是因为磁绝缘线振荡器存在一个门槛电压,当工作电压小于门槛电压时,磁绝缘线振荡器不能正常工作,只有工作电压大于门槛电压时,磁绝缘线振荡器才能正常工作。对于本器件,门槛电压约为 500kV,图 5 中工作电压的幅值为 538kV,工作电压在 500 ~ 538kV 之间的脉宽约为 30ns,有效工作电压的脉宽本身较窄。再者,大于门槛电压的工作电压加到器件上后,并不能立即产生高功率微波辐射,因为本器件从起振到振荡饱和约需 15ns (参见图 6),所以 30ns 的有效工作电压所产生的微波脉

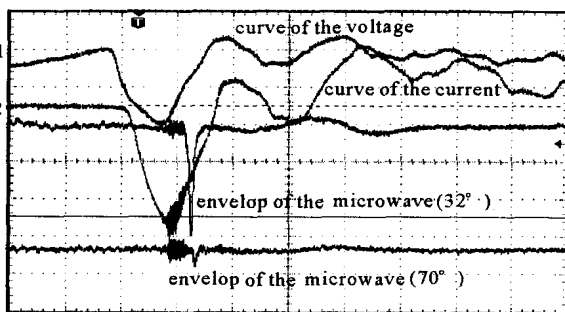


Fig. 5 Waveform for radiated power measurement

图 5 功率测量得到的波形(曲线 3)

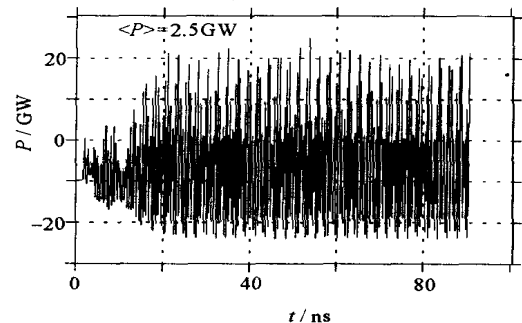


Fig. 6 Output power versus time

图 6 输出功率随时间变化图

冲半高宽只有 15ns 左右。

图 6 为工作电压为 680kV, 电流为 58kA 的情况下, 模拟中得到的微波输出功率。0 ~ 90ns 平均输出功率为 2.5GW, 工作主频为 1.75GHz, 0 ~ 90ns 的平均效率为 6.3%。

5 结 论

对本课题组设计的紧凑型 L 波段 MILO 进行了实验研究。在二极管电压为 515 ~ 538kV, 电流为 58 ~ 61kA 的情况下, 实验中获得了 1.76 ~ 1.78GHz, 2.2 ~ 2.5GW 的 TM_{01} 模高功率微波辐射, 功率转换效率为 7.3% ~ 7.9%。模拟结果和实验测量结果符合得较好。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Don Shiffler, Baca G, Englert T, et al. Investigation of RF breakdowns on the MILO [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**(3):304—311.
- [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. (Yang Y L, Ding W. MILO physic analysis and numerical simulation. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5):623—627)
- [4] 丁武. 磁绝缘线振荡器中空间电荷的调制 [J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(2):213—216. (Ding W. Modulation of the space charge in MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2):213—216)
- [5] 丁武, 杨郁林. 磁绝缘线振荡器中空间电荷的辐射 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1):115—118. (Ding W, Yang Y L. Radiation of the space charge in a magnetically insulated transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1):115—118)
- [6] 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 transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1):93—96)
- [7] 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)
- [8] Haworth M, Allen K, Baca G, et al. Recent progress in the hard tube MILO experiment [A]. *Proc of SPIE* [C]. 1997, **3159**:28—39.
- [9] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**(3):698—713.
- [10] 刘松. 磁绝缘线振荡器的研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2001, 6:86. (Liu S. Investigation of a magnetically insulated transmission line oscillator. Changsha: College of Science, National University of Defense Technology, 2001, 6:86)
- [11] 樊玉伟, 舒挺, 王勇, 等. 紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的实验设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6):767—769. (Fan Y W, Shu T, Wang Y, et al. Experimental design of a compact L band magnetically insulated transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):767—769)
- [12] 刘克成, 宋学诚. 天线原理 [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1989. (Liu K C, Song X C. Principles of antenna. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1989)
- [13] 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. Measurement of high power microwaves in the far field zones. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5):485—488)

Experimental investigation of a compact L band magnetically insulated transmission line oscillator

FAN Yuwei^{1,2}, SHU Ting¹, WANG Yong¹, LI Zhiqiang¹, ZHOU Jinjuan¹, ZHAO Yansong¹

(1. College of Optoelectrical Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Air Defense Command Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A compact L band magnetically insulated transmission line oscillator (MILO), which has a new type mode converter and a new type beam dump which increases a beam dump disk, a no-cavity RF choke and a carefully designed impedance discontinuity between the choke vane section and the SWS vane section, is experimentally investigated. The compact MILO is driven by a self-built 600kV, 80ns, 100ns pulser: SPARK201. When the input voltage is 515 ~ 538kV, and the diode current is 58 ~ 61kA, high power microwaves of the TM_{01} mode are generated from the device with a frequency of 1.76 ~ 1.78GHz, an output power of 2.2 ~ 2.5GW, and the power conversion efficiency of 7.3% ~ 7.9% in experiments. In this case, the duration of the effective voltage (above the threshold voltage, 500kV) is 30ns, and the duration of the radiated microwave is 15ns (FWHM). The experimental results agree well with that of simulation.

Key words: Magnetically insulated transmission line oscillator (MILO); Slow wave structure (SWS); High power microwave