

文章编号: 1001-4322(2004)06-0767-03

紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的实验设计^{*}

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 理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 郑州防空兵学院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 设计加工了一个 L 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 515 ~ 538kV, 二极管电流为 58 ~ 61kA 的条件下, 获得了频率为 1.76 ~ 1.78GHz, 功率为 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%。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; PIC 方法

中图分类号: TN753.4

文献标识码: A

磁绝缘线振荡器(MILO)是输出功率在 GW 量级的同轴正交场器件, 是高功率微波研究领域的热点之一^[1~7]。它的优点是直流绝缘磁场由其内部电流提供, 无需外加磁场。这一直流磁场起到阻止电子从阴极发射到阳极的作用。这种自绝缘机制可在一定程度上避免阴阳极之间的电击穿, 使其能在数百 kV 外加电压下, 输入几十 GW 的电功率, 并以 GW 量级输出微波^[1]。从现有文献资料看, 国外已在实验中获得了 2.0GW 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, 实验中测到的微波辐射功率还在百 MW 量级^[10]。本文设计了一个 L 波段磁绝缘线振荡器, 器件加工后进行了实验研究。在二极管电压为 515 ~ 538kV、电流为 58 ~ 61kA 的情况下, 获得了频率为 1.76 ~ 1.78GHz, 功率为 2.2 ~ 2.5GW 的 TM_{01} 模微波辐射。

1 设计及实验

1.1 扼流叶片的设计

硬管 MILO 的扼流叶片大多为 3 片, 即有两个扼流腔。利用高频场分析程序计算发现, 两个扼流片依然可以很好地阻止微波功率向脉冲功率源方向泄漏, 其能量反射率可达 99.4%, 相对于 3 个扼流片的能量反射率 99.9% 下降了 0.5%, 影响很小。图 1 是高频场分析程序计算的束波作用区电场分布图, 从图 1 中可以看出, 扼流片左侧无电场分布, 说明微波能量几乎全部被反射了。减少 1 个扼流片可以使 MILO 结构更加紧凑, 有利于器件的小型化。

1.2 阴极杆的设计

由于扼流叶片长度大于主慢波叶片长度, 故扼流片与阴极杆之间容易产生电击穿, 这将导致 MILO 的脉冲缩短, 功率下降。为了解决这一问题, 一方面将阴极杆设计为变阻抗结构, 使扼流片下面的阴极杆半径减小, 以减弱此处的电场强度; 另一方面, 在阴极杆半径增大后的电子发射区粘贴天鹅绒, 这样既可以使电子发射得更加均匀, 又可以增大发射电流。

1.3 收集筒和支撑杆的设计

硬管 MILO 收集极的典型结构为收集筒, 靠阴极杆侧向发射电子提供磁绝缘电流。这种结构的缺点是阴极杆伸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, 且磁绝缘电流调整困难。本文设计的收集筒采用阴极侧向和轴向共同发射电子的方式, 可以有效地减小阴极杆深入收集筒的长度, 从而使装置更加紧凑, 同时, 可以方便地大幅度调整磁绝缘电流。

在实验装置中, 收集筒是靠两组支撑杆与阳极外筒相连接的, 即支撑杆处于微波提取窗口中。由于支撑杆的存在, 会引起微波的反射, 并可能激励起杂散模式。利用高频场分析程序, 设计了具有 4 根支撑杆的支撑装置, 尽可能降低微波反射, 确保提取出来的微波功率能够有效地输出。

1.4 模式转换器的设计

微波提取窗口是同轴结构, 其中的主模是 TEM 模, 装置末端是圆波导, 希望将同轴结构中的 TEM 模转换

* 收稿日期: 2003-11-03; 修订日期: 2004-01-29

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 樊玉伟(1972—), 男, 硕士研究生, 从事高功率微波技术研究; E-mail: 9108212@sohu.com。

成圆波导中的 TM_{01} 模以利于微波输出,这需要模式转换器来实现。利用高频场分析程序设计了模式转换器。图 2 是实际加工的的模式转换器照片。高频场分析程序计算表明,考虑到支撑杆的影响后,TEM 模通过模式转换器转换为 TM_{01} 模的能量转换率仍大于 98%。利用高频场分析程序计算远场辐射,可以得到 2 维极坐标系中天线的辐射方向图,见图 3。可以看出,远场辐射是 TM_{01} 模式。

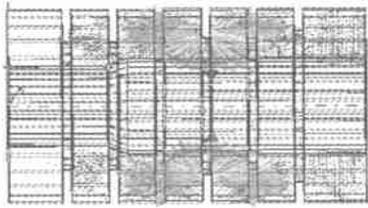


Fig. 1 Spatial distribution of electric field

图 1 电场的空间分布

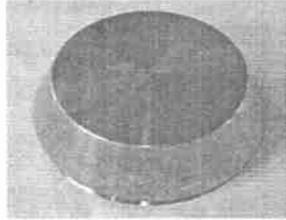


Fig. 2 Photograph of the changer of the mode

图 2 模式转换器照片

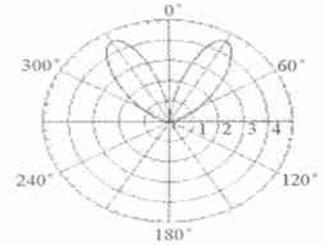


Fig. 3 Antenna directivity pattern

图 3 辐射方向图

2 典型模拟结果

为了和本实验室的加速器配合使用,对文献[11]中的模型参数进行了调整。调整后结构总长为 54cm,采用变阻抗阴极结构,使用两个扼流片,磁绝缘电流采用侧向和轴向共同发射的方式。典型模拟结果如图 4 和图 5 所示。在工作电压为 680kV,电流为 58kA 的情况下,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%。图 4 为典型的微波输出功率随时间变化图,可以看出 20ns 达到饱和态。图 5 是输出微波的功率谱,微波主频为 1.75GHz,属于 L 波段,且单频性很好。

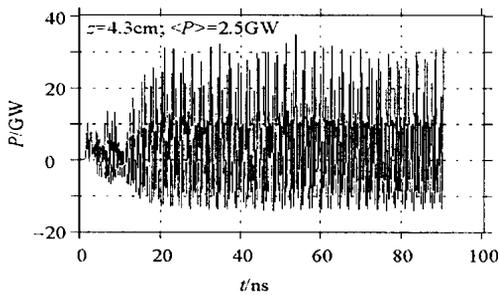


Fig. 4 Output power versus time

图 4 微波输出功率随时间变化图

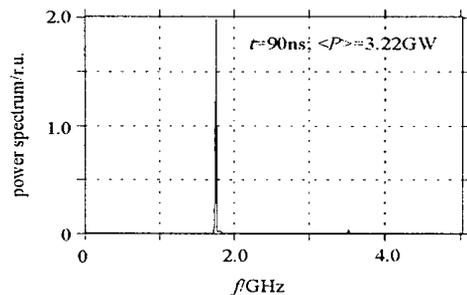


Fig. 5 Power spectrum of the microwaves

图 5 微波的功率谱

3 实验结果

对加工后的 MILO 器件进行了实验研究。实验重复多炮,在二极管电压为 515~538kV,电流为 58~61kA 的条件下,获得了频率为 1.76~1.78GHz,功率为 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%。取其中一炮进行分析。图 6 是利用 TDS7154 示波器在微波频率测量中测得的微波波形,对应 10 个周期,时间间隔为 5.68ns。由此可知,微波频率为 1.76GHz。多炮重复测量,频率范围为 1.76~1.78GHz,且稳定性很好。图 7 是利用 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。

此外,还对辐射模式进行了测定,结果见表 1。经分析,主模式为 TM_{01} 模。通过标定,微波辐射功率为 2.5GW,功率转换效率为 7.6%。表 1 中 θ 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

θ / (°)	- 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

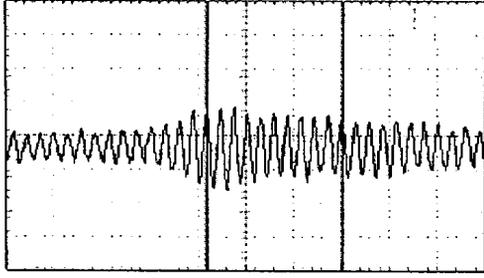


Fig. 6 Waveform for frequency measurement
图6 频率测量得到的波形

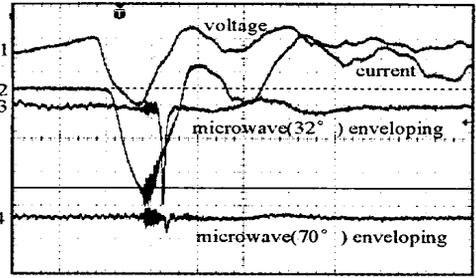


Fig. 7 Waveform for radiated power measurement
图7 功率测量得到的波形

4 结论

MILO 是高功率微波研究领域的热点之一。由于 MILO 器件电子束对称发射的控制比较困难,同时存在电场击穿问题的困扰,国内对 MILO 器件实验研究的进展不快。本文针对这两点主要问题,采取了一些措施,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 L 波段紧凑型 MILO。加工后进行了实验研究,实验中测得了基于 MILO 机制 2.2~2.5 GW 的微波辐射,频率为 1.76~1.78 GHz,模式为 TM_{01} 模,功率转换效率为 7.3%~7.9%。实验结果与模拟结果符合得较好。

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] Shiffler D, Baca G, Englert T, et al. Investigation of RF Breakdowns on the MILO [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**(3): 304.
- [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, **3158**: 36—47.
- [9] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26**: 698—713.
- [10] 刘松. 磁绝缘线振荡器的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2001. 86. (Liu S. Investigation of a magnetically insulated transmission line oscillator. Changsha: National University of Defense Technology, 2001. 86)
- [11] 樊玉伟, 舒挺, 李志强. 紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的粒子模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(12): 1125—1127. (Fan Y W, Shu T, Li Z Q. Particle simulation of a compact L-band magnetically insulated transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12): 1125—1127)

Experimental design of a compact L-band magnetically insulated transmission line oscillator

FAN Yu-wei^{1,2}, SHU Ting¹, WANG Yong¹, LI Zhi-qiang¹, ZHOU Jir-juan¹, ZHAO Yar-song¹

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

2. Zhengzhou Air Defence Forces Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A compact L-band magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) is configured and fabricated. 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 the frequency of 1.76~1.78GHz, output power of 2.2~2.5GW, and the power conversion efficiency of 7.3%~7.9% in experiments. The experimental results agree well with that of simulation.

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