

文章编号: 1001-4322(2007)02-0284-04

C 波段磁绝缘线振荡器的数值模拟*

郭焱华, 何 琥, 范植开, 陈代兵, 王 冬

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 利用 2 维全电磁 PIC 程序进行数值模拟, 设计了一种 C 波段磁绝缘线振荡器。该振荡器在阴极电子发射起点加圆环, 控制此处电子束的发射密度, 来减少电子能量的损耗, 改善束-波相互作用, 逐渐加大慢波结构的后两个叶片的内半径, 增大微波群速度, 便于谐振腔中的能量输出, 提高微波输出效率, 采用两个扼流片有效地阻止了微波功率向二极管区泄漏, 相应减小了器件的尺寸。当外加电压为 430 kV、束流 46 kA 时, 饱和后输出微波平均功率 2 GW, 频率 3.51 GHz, 功率转换效率 10%。

关键词: 磁绝缘线振荡器; 慢波结构; 高功率微波; PIC 方法; 数值模拟

中图分类号: TN732.2 文献标识码: A

磁绝缘线振荡器(MILO)是 GW 量级的同轴正交场器件, 1987 年由 R. W. Lemke 和 M. C. Clark^[1]提出, 经过 20 年的研究, 这种器件实验上在 L 波段最大输出功率超过 3 GW, 脉宽近 200 ns, 单脉冲能量达 600 J, 能量效率最大可达 7%, 单脉冲比能位于 GW 量级高功率微波器件的首位, 是高功率微波研究领域的热点之一^[2]。C 波段 MILO 的研究工作主要集中在国内, 杨郁林和丁武研究了高频大功率磁绝缘线振荡器的理论设计问题^[3], 孙会芳设计了阳极为双渐变结构的改进型 MILO^[4], 刘松研究了渐变型 C 波段 MILO^[5], 张晓萍设计了一种利用负载电流产生微波的新型 MILO^[6], 分别对渐变型和负载限制型两种 MILO 结构进行了设计和优化, 取得了比较好的模拟结果。在此基础上, 本文提出了一种 C 波段 MILO 结构, 在阴极电子发射起点处加圆环, 改变阴极电子发射起点附近的电场, 电子束能较快地达到磁绝缘, 并且避免了阴极局部发射电子束密度过大, 减少了电子能量的损耗, 使 MILO 慢波结构中束-波相互作用得到改善。逐渐加大慢波结构后的两个叶片的内半径, 扩大了电子的活动空间, 同时增大微波群速度, 减小谐振腔的有载 Q 值, 从谐振腔中耦合到同轴传输区的微波能量提高, 有利于微波能量的输出。

1 MILO 的结构和工作原理

C 波段 MILO 采用 Phillips 空军实验室 L 波段 MILO 结构。由于微波频率随 MILO 的空间尺寸减小而增大, 从 L 波段变为 C 波段就必须缩小 MILO 的尺寸^[3]。C 波段 MILO 的结构如图 1 所示。

工作原理: 在输入端加几百 kV 的高电压, 在强电场的作用下电子从阴极的侧面发射出来。在收集极内从阴极侧面发射形成轴向流动的电子运动到收集极, 这部分电子束流称为负载电流, 其功能是产生一个围绕阴极的角向磁场, 该磁场对慢波结构(SWS)区的电子束起磁绝缘作用。处

于 SWS 区的电子在阴阳极间的径向电场和角向磁场的共同作用下沿轴向漂移, 当电子的漂移速度接近阳极 SWS 微波场的相速度时, 电子束与场相互作用, 电子束的能量转换为场的能量, 产生高功率微波^[1]。

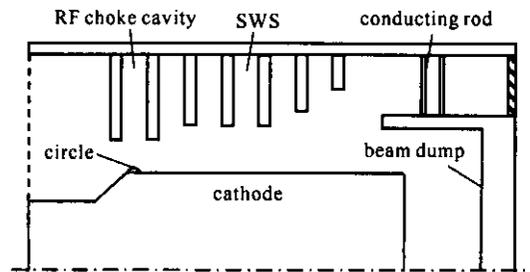


Fig. 1 Configuration of the MILO

图 1 MILO 结构示意图

2 MILO 设计

2.1 阴极设计

MILO 中的电子发射方式采用爆炸发射, 虽然阴极爆炸发射能提供几 kA/cm^2 发射电流密度。由于扼流

* 收稿日期 2006-07-13; 修订日期 2007-02-07

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 郭焱华(1967—), 女, 硕士, 主要从事微波器件研究; gyh1121618@sohu.com。

片与阴极距离比较近,束流发射起点处电场强度大,发射电流密度最高。在电子没有被磁绝缘之前,扼流片与阴极之间可能发生直流场击穿而导致电子流失,使得主慢波结构中参与相互作用的电子数减少,微波输出功率急剧下降甚至无微波输出。其次,高密度电子轰击扼流片会产生二次电子,二次电子与腔内残留的中性气体碰撞,使中性气体电离,从而形成等离子体。形成的等离子体影响束流发射,造成阴极表面上电子发射不均匀,难以形成好的电子轮辐,电子束与场相互作用减弱,微波功率大幅度下降。因此,考虑在阴极电子发射起点处加圆环,来改变阴极电子发射起点附近的电场,使阴极电子发射起点附近发射的初始电子向相互作用区运动,不直接轰击扼流片。数值模拟表明阴极电子发射起点处加圆环比不加圆环的电子束能较快地达到磁绝缘,当电子磁绝缘后,阴极电子发射起点处的电子不再轰击扼流片,在阴极面上电子发射较均匀,阴阳极间的电子轮辐形状很好,有利于束-波相互作用。同时加圆环避免了在阴极电子发射起点处局部电子束密度过大,减少了电子能量的损耗,使 MILO 慢波结构中束-波相互作用得到改善,提高微波输出功率。

2.2 慢波叶片设计

经过数值模拟合理地选择结构尺寸,阴极半径 3.1 cm、慢波叶片内半径 4.8 cm、周期 1.8 cm、叶片厚度 0.3 cm。由于扼流腔深度比主慢波结构深,扼流腔的第一个截止频率为 3.36 GHz,主慢波结构为 3.78 GHz。在主慢波结构中频率高于扼流腔截止频率的微波就会被扼流片阻断^[7],而器件输出微波的频率是 3.51 GHz,因此两个扼流片可以阻止微波功率向二极管区泄漏。

主慢波结构只用 4 个腔就可以使束波产生比较好的相互作用,减少腔的个数可以避免角向对称模式之间的竞争。但是阳极慢波结构相邻叶片间的电场处于 π 模状态,此状态下形成的场具有全驻波性质,其群速度为零,能量不易向外传播。因此,采用渐变型 C 波段 MILO 结构,逐渐加大阳极 SWS 后两个叶片内半径,增大微波群速度,便于谐振腔中的能量输出,提高微波输出效率。图 2 为慢波结构均匀段和渐变段色散曲线,渐变段色散曲线截止频率比均匀段高,通带变宽。MILO 工作点位于均匀段色散曲线最高点 A 点附近($\Phi = \pi$), π 模附近群速度接近零。进入渐变段后,由于工作频率不变,MILO 工作点位于 B 点,工作于行波状态,群速度增大。图 3 为轴向电场 E_z 空间分布图,从图 3 看出中间 3 个叶片间的电场处于 π 模状态,而后两个叶片间的电场不是 π 模,行波代替了驻波,有利于能量向外传播。在慢波结构中, E_z 最大值为 380 kV/cm,小于交流电场击穿阈值 1 MV/cm,不会发生射频击穿。图 4 为径向电场 E_r 的空间分布图,显示输出通道中微波传播较好。后两个叶片内半径的加大,相应增大了微波的提取间隙,也就是适当减小谐振腔的有载 Q 值,从谐振腔中耦合到同轴传输区的微波能量提高。并且叶片内半径的增大,扩大了电子的活动空间,防止电子束被阳极吸收,在降低电场强度的同时也降低了对磁场的要求,即减少了收集极区截获的电子数,更多的电子参与慢波结构下的束-波相互作用,提高了功率转换效率。

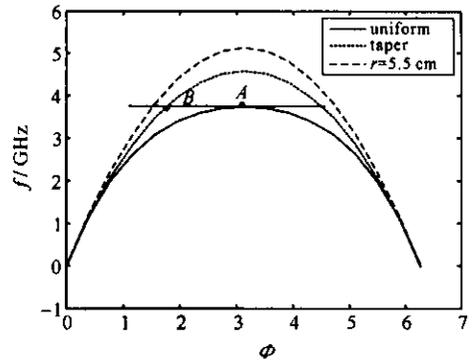


Fig. 2 Dispersion curve of uniform and taper SWS
图 2 SWS 渐变段与均匀段色散曲线

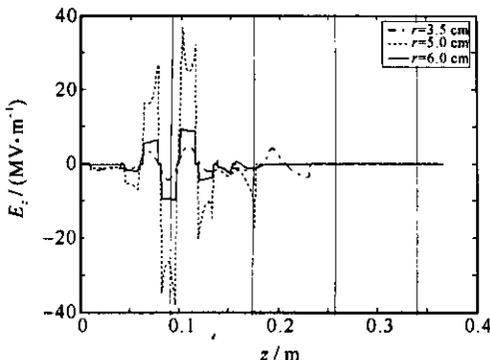


Fig. 3 Spatial distribution of axis electric field
图 3 轴向电场的空间分布

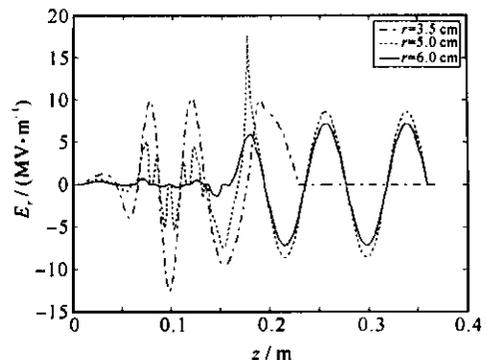


Fig. 4 Spatial distribution of radial electric field
图 4 径向电场的空间分布

3 数值模拟

典型模拟结果如图 5~8 所示。从图 5 粒子轨迹中看出,在主慢波区形成 π 模场,束-波相互作用使电子群聚形成轮辐,电子轮辐群聚较好。由于阴极电子发射起点处加圆环,使该处附近发射的电子向互作用区运动,避免了阴极发射起点处的电子直接轰击扼流片,有效地利用了电子的能量,提高了慢波结构中束-波相互作用效率。其次,采用 2 个内径渐变的提取叶片,使提取间隙的电场与同轴输出结构的电场相匹配,实现了较好的微波提取,增加了微波输出功率。图 6 为二极管电压波形。当二极管电压为 430 kV 时,图 7 给出了输出功率随时间变化,从图中可以看到输出峰值功率为 4.8 GW(微波平均功率 2 GW,平均功率转换效率为 10%)。图 8 为功率频谱,图中显示输出微波的频率为 3.51 GHz。

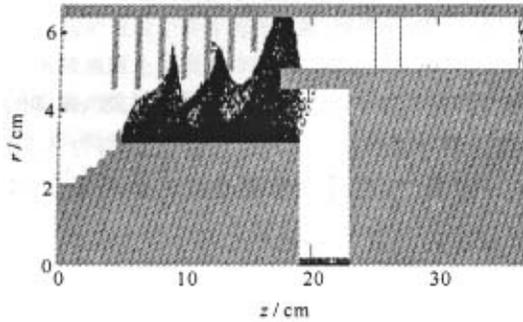


Fig. 5 Trajectories of the particles

图 5 粒子轨迹

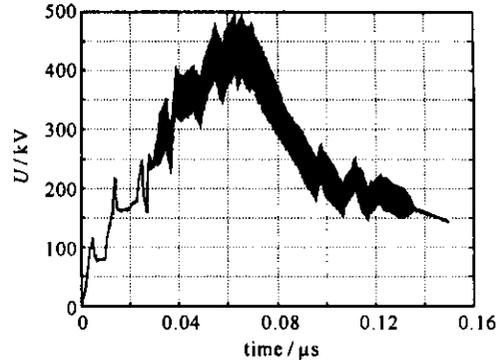


Fig. 6 Diode voltage

图 6 二极管电压

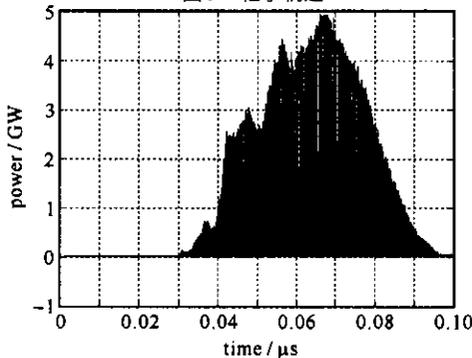


Fig. 7 Output power vs time

图 7 输出功率随时间变化

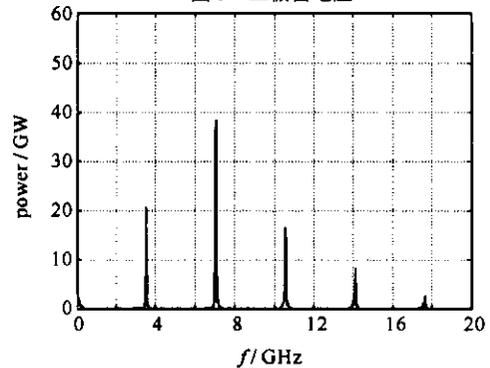


Fig. 8 Output power spectrum

图 8 功率频谱图

4 结 论

MILO 工作时二极管输入电压和阴极发射电子束流比较高,阴极发射的电子束和形成轮辐的电子束轰击阳极叶片,不可避免会造成电子能量的损耗,使慢波结构中束-波相互作用减弱,影响微波功率。通过改进阴极结构,在阴极电子发射起点处加圆环,避免了电子发射起点处电子束密度过大,减少了电子发射起点处电子能量的损耗,使更多电子参与慢波结构中电子束与微波的能量交换,束-波相互作用得到改善,提高微波输出功率。基于渐变型 MILO 的理论,逐渐加大阳极慢波结构后两个叶片内半径,扩大了慢波结构后面电子的活动空间,防止电子束被阳极吸收,同时增大了微波群速度,便于微波能量输出。在输入电压 430 kV、束流 46 kA 时,输出微波平均功率 2 GW,频率 3.51 GHz,功率转换效率 10%。

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] 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)
- [3] 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)

- [4] 孙会芳,董志伟,姜幼明.改进型磁绝缘线振荡器的设计和数值模拟[J].强激光与粒子束,2003,15(12):1220-1224.(Sun H F, Dong Z W, Jiang Y M. Design and numerical simulation of an improved type MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12) :1220-1224)
- [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. Tapered C-band magnetically insulated transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1) 93-96)
- [6] 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. New type MILO using load current to produce microwave. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1) 80-84)
- [7] 郭焱华,范植开,何琥,等.磁绝缘线振荡器高频特性分析[J].强激光与粒子束,2005,17(3):436-440.(Guo Y H, Fan Z K, He H, et al. Numerical analysis on the high frequency characteristics of MILO. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3) 436-440)
- [8] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, **26** 698-713.

Numerical simulation of an improved type C-band MILO

GUO Yan-hua, HE Hu, FAN Zhi-kai, CHEN Dai-bing, WANG Dong

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

Abstract : Using a 2.5 dimensional fully electromagnetic particle-in-cell (PIC) code , a new type of MILO was designed. A circle is placed at the launch point to improve the interaction between the electron beam and the fields supported by the slow wave structure , thus to control the beam current density at the launch point , and to minimize the loss of the electron beam energy. The inner radii of the extractor vanes are slightly larger than those of other SWS vanes , which increases the axial group velocity and enhances the microwave output power and efficiency. Implementation of two RF choke vanes stops the leakage of microwave pulse power toward the diode , and makes the device more compact than the conventional MILO. High power microwave is generated from the device with an average output power of 2 GW , a frequency of 3.51 GHz and an efficiency of 10% .

Key words : Magnetically insulated line oscillator (MILO) ; Slow wave structure (SWS) ; High power microwave (HPM) ; PIC method ; Numerical simulation