

L 波段高阶模抑制型磁绝缘线振荡器研究*

秦奋[†] 王冬 陈代兵 文杰

(中国工程物理研究院, 应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

(2011 年 5 月 19 日收到; 2011 年 9 月 10 日收到修改稿)

根据磁绝缘线振荡器 (magnetically insulated transmission line oscillator, MILO) 中基模 (TM₀₀ 模) 与临近高阶模 (HEM₁₁ 模) 高频场分布的区别, 采用破坏各腔之间 HEM₁₁ 模 π 模谐振条件的方式抑制器件中高阶模产生的方法, 提出了高阶模抑制型 MILO. 运用三维全电磁粒子模拟软件对高阶模抑制型 L 波段 MILO 器件进行模拟研究, 数值模拟结果表面该方法能够抑制器件中 HEM₁₁ 模的产生. 在此基础上对器件进行了对比性实验研究, 实验结果表明高阶模抑制型器件能够抑制 HEM₁₁ 模的产生, 稳定工作在基模.

关键词: 磁绝缘线振荡器, 基模, HEM₁₁ 模, 高功率微波

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 41.60.Bq, 52.59.Ye

1 引言

磁绝缘线振荡器 (MILO) 是一种吉瓦级低阻抗正交场振荡器 (crossed-field oscillator), 它是 1987 年 Lemke 和 Clark 提出来的^[1]. 由于无需外加引导磁场, 使得 MILO 在器件小型化、结构紧凑化等方面具有得天独厚的优势, MILO 经过十几年的发展已经成为高功率微波研究领域的热点之一^[2-5].

然而结构不对称、电子发射不均匀、高频结构设计不合理等因素都可能导致 MILO 器件中激励起与基模 TM₀₀ 模邻近的非期望高阶模式——HEM₁₁ 模^[5-8]. 高阶模的产生导致器件出现工作不稳定、输出功率降低以及输出频谱不纯等一系列问题. 因此高阶模模式竞争成为 MILO 研究中亟需解决的问题.

文献 [6] 采用 KARAT 程序对 C 波段 MILO 进行了三维数值模拟, 通过非对称激励机理产生了实验中经常出现的高阶模式. 文献 [7] 通过数值模拟研究探索了阴极电子发射方式、电压上升前沿、输入电压大小等各种非对称激励机理对产生微波模式的影响. 文献 [8, 9] 独辟蹊径, 首次提出了工作在 HEM₁₁ 模的 MILO 器件——通过合理设计器件慢波结构, 使器件稳定工作在 HEM₁₁ 模. 文

献 [10] 中首次提出了一种高阶模抑制型 MILO, 并以 C 波段 MILO 为例进行了数值模拟研究.

本文针对 L 波段 MILO 实验中遇到的高阶模输出情况, 对 L 波段高阶模抑制型 MILO 进行了数值模拟及初步实验研究. 数值模拟与实验结果均表明, 高阶模抑制型 MILO 能够有效抑制器件中 HEM₁₁ 模的产生, 使器件稳定工作在基模.

2 理论分析^[10]

MILO 器件的慢波结构是一个同轴谐振腔链, 任何模式想要在器件被激励起来并稳定工作的必要条件是该模式在相邻谐振腔之间的相移为 π , 即

$$E_z(r, \theta, z + L_0) \cong E_z(r, \theta, z)e^{-j\pi} \\ = -E_z(r, \theta, z), \quad (1)$$

其中 (r, θ, z) 为慢波结构中任意点坐标, L_0 为慢波结构周期. 不能满足条件 (1) 的模式不能在器件中稳定工作.

与基模 TM₀₀ 模最邻近的高阶模是 HEM₁₁ 模, 其场分布存在一个非零角向波数^[8,9], 在谐振腔中横向角对称的两个点场分布满足如下关系:

$$E_z(r, \theta + \pi, z) = E_z(r, \theta, z)e^{-j\pi}$$

* 国家高技术研究发展计划及中国工程物理研究院发展基金 (批准号: 2010B0402060) 资助的课题.

[†] E-mail: qinfen@mail.ustc.edu.cn

$$= -E_z(r, \theta, z). \quad (2)$$

因此 HEM_{11} 模的条件 (1) 可化为

$$E_z(r, \theta, z) = E_z(r, \theta + \pi, z + L_0). \quad (3)$$

不满足条件 (3) 该模式将无法稳定工作.

如果将 MILO 慢波叶片沿径向开一个小角度 (一般不大于 5°) 的槽 (图 1), 此时第一个模式 (基模) 场分布及谐振频率与未开槽叶片中 TM_{00} 模相近, 为类 TM_{00} 模 (称为模式 1); 后两个模式谐振频率与未开槽结构 HEM_{11} 模类似, 是由 HEM_{11} 模去简并分裂而成的两个极化方向互相垂直的模式; 其中一个模式极化方向与开槽方向垂直 (称为模式 2), 另一个极化方向与开槽方向平行 (称为模式 3). 这两个类 HEM_{11} 模式极化方向固定, 只要将相邻谐振腔间开槽的角向位置错开, 条件 (3) 将不能满足. 也就是说, 可以通过改变相邻叶片开槽位置关系来抑制 HEM_{11} 模的激励. 而类 TM_{00} 模场分布角向均匀, 不受开槽错位的影响, 将能在 π 模稳定工作. 这样, 就可以抑制 HEM_{11} 模使器件稳定工作在基模.

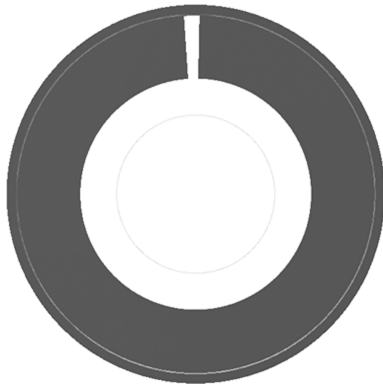


图 1 开槽慢波叶片

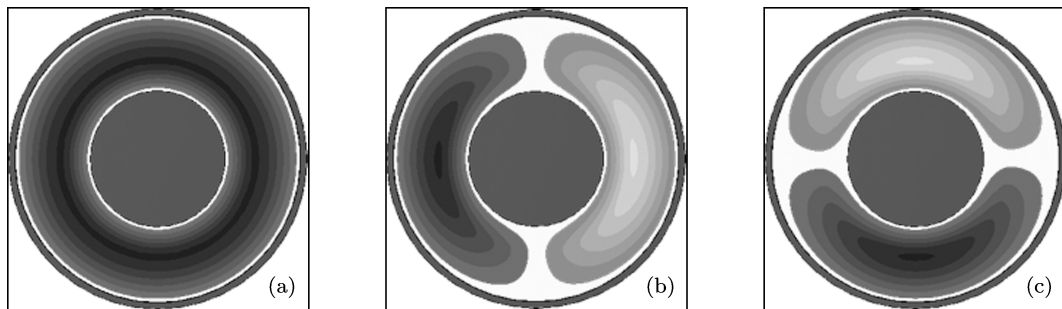


图 3 未开槽腔体前三个模式分布图 (a) TM_{01} 模; (b) HEM_{11} 模式 1; (c) HEM_{11} 模式 2

3 数值模拟

L 波段 MILO 结构如图 2 所示^[11], 该结构采用了 6 个叶片, 前两片为扼流片, 内外半径分别为 78 mm 和 136 mm; 中间三片为主慢波叶片, 内外半径分别为 88 mm 和 136 mm, 最后一块为提取叶片, 内外半径分别为 96 mm 和 136 mm, 它与收集极构成提取间隙实现功率提取. 主慢波结构周期为 39 mm, 叶片厚度为 7 mm.

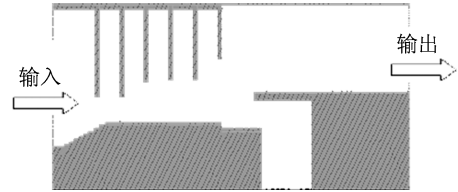


图 2 L 波段 MILO 结构示意图

对器件谐振腔进行高频分析, 在相邻谐振腔之间相移为 π 的情况下, 未开槽与开槽叶片 (图 1, 各叶片开槽方向一致) E_z 场横向分布分别如图 3、图 4 所示. 开槽前, 第一个模式为基模 TM_{00} 模, 谐振频率为 1.38 GHz; 接下来两个模式是 HEM_{11} 模的简并模式, 谐振频率为 1.49 GHz. 开槽后第一个模式分布与 TM_{00} 模相近, 谐振频率也是 1.38 GHz, 与未开槽叶片 TM_{00} 相同; 模式 2 与模式 3 为 HEM_{11} 模去简并后的两个模式: 模式 2 谐振频率为 1.41 GHz, 极化方向与开槽方向垂直; 模式 3 谐振频率为 1.49 GHz, 极化方向与开槽方向平行. 由于不是严格工作在 π 模以及电子注的影响, 器件实际工作频率会略低于谐振腔 π 模谐振频率. 通过高频分析可以发现, 开槽叶片中模式 2 与模式 3 的极化方向与开槽方向成固定关系 (平行或垂直), 如果将叶片间开槽位置错开, 关系 (3) 将不再满足, 即模式 2 与模式 3 不能稳定工作在 π 模从而被抑制. 而对于类 TM_{00} 模分布的基模, 开槽错位不会影响 π 模谐振条件 (1), 可以稳定工作在 π 模.

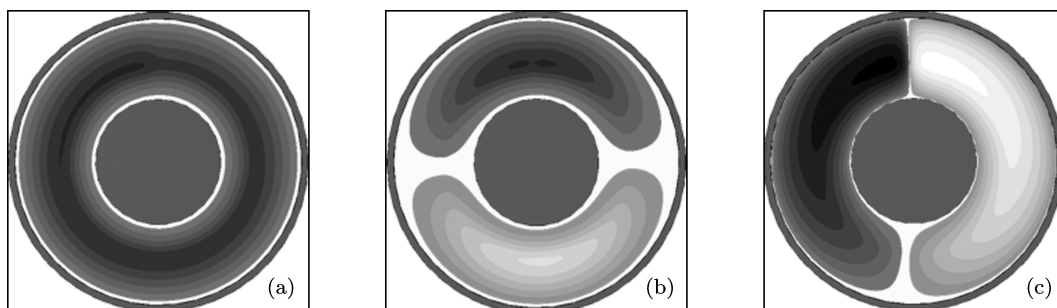


图4 开槽腔体前三个模式分布图 (a) 模式 1; (b) 模式 2; (c) 模式 3

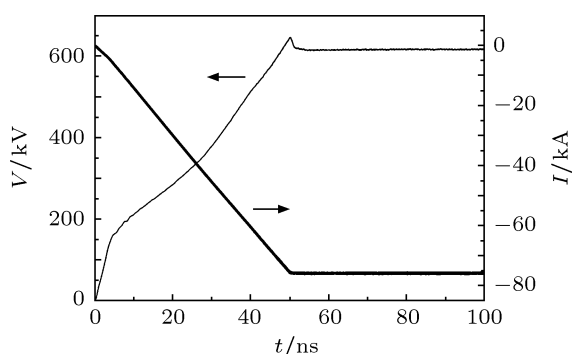


图5 输入电压电流波形

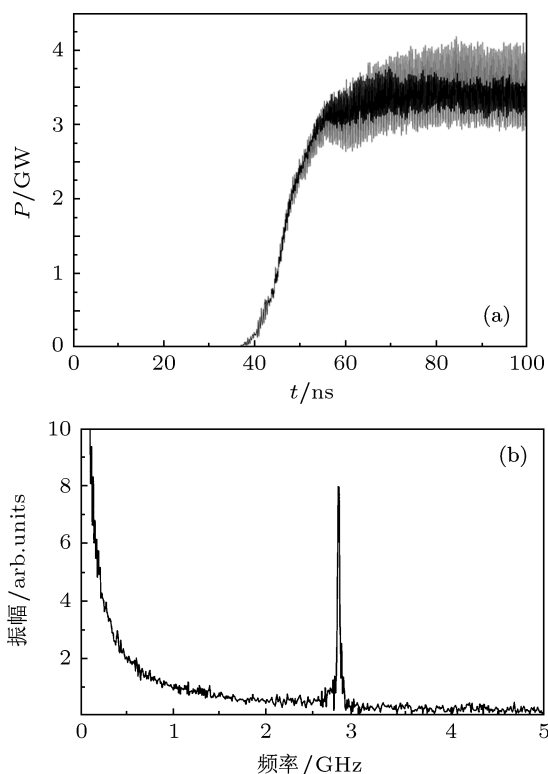


图6 原始结构器件输出微波功率时域波形 (a) 及频谱 (b)

运用 3 维全电磁粒子模拟软件对器件进行粒子模拟. 输入电压幅值为 617 kV, 上升沿为 50 ns. 原始结构及高阶模抑制型 MILO 输出微波功率时

域波形、对应频谱及同轴输出段出口电场分布矢量图如图 6—9 所示. 在慢前沿 (50 ns) 电压激励下 [7], 原始结构输出微波主频为 1.39 GHz(功率谱主频为 2.78 GHz.); 输出口电场分布均表明输出微波模式为 TE_{11} 模. 输出功率波形中交流成分较小, 较大的直流成分表明输出微波主要是圆极化波 [9]. 由此反推器件工作在 HEM_{11} 模式. 因此在实验研究时原始结构有可能因结构对称性稍差或电子发生不均匀等因素而产生高阶模模式竞争.

在同样输入电压条件下, 高阶模抑制型 MILO 器件输出微波主频为 1.29 GHz(功率谱主频为 2.58 GHz.), 输出口电场分布显示输出模式为 TEM 模. 由此反推出器件工作在基模 (类 TM_{00} 模), HEM_{11} 模式被有效抑制.

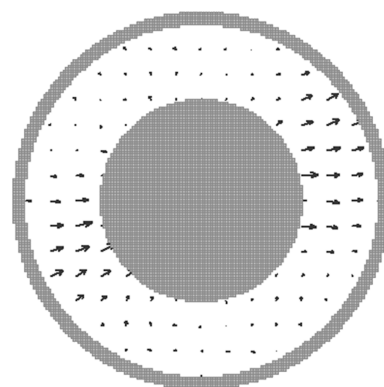


图7 原始结构输出口电场分布

4 实验研究

为了验证数值模拟结果, 开展了对比实验研究. 首先对原始结构 L 波段 MILO 器件进行了实验研究. 器件结构同图 2. 典型输出微波波形如图 10 所示. 输出微波频谱较乱, 出现了高阶模与基模的模式竞争; 主频约 1.42 GHz, 对应于 HEM_{11} 模; 另外稍小的一个频率成分约为 1.3 GHz, 对应基

模 TM_{00} 模.

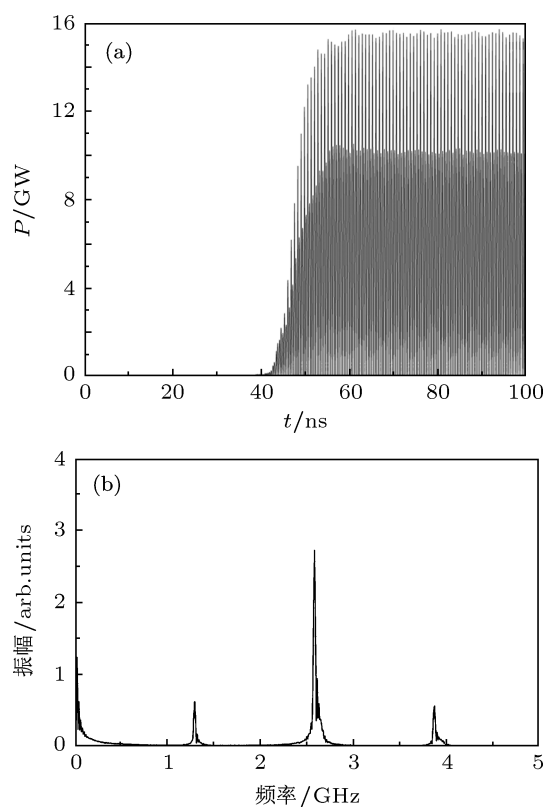


图 8 高阶模抑制型器件输出微波功率时域波形 (a) 及频谱 (b)

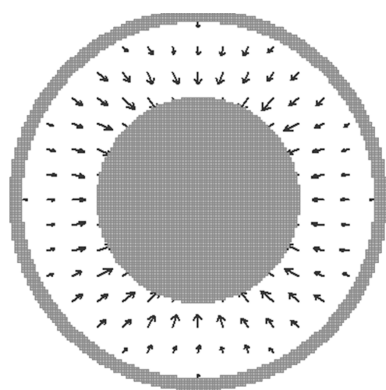


图 9 高阶模抑制型器件输出口电场分布

接着对高阶模抑制型 L 波段 MILO 进行了实验研究. 与原结构相比, 三片主慢波叶片都沿径向开了一个约 5° 的槽, 并且将三个叶片的开槽位置在角向相互错开. 器件其余部分结构与原 MILO 结

构相同. 典型实验波形如图 11 所示. 输出微波频率约为 1.3 GHz, 对应基模谐振频率, 与数值模拟结果相符. 重复实验结果表明器件工作模式稳定, 没有观察到高阶模式出现.

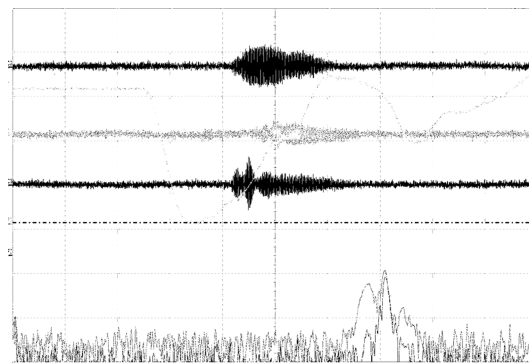


图 10 原始结构典型实验波形

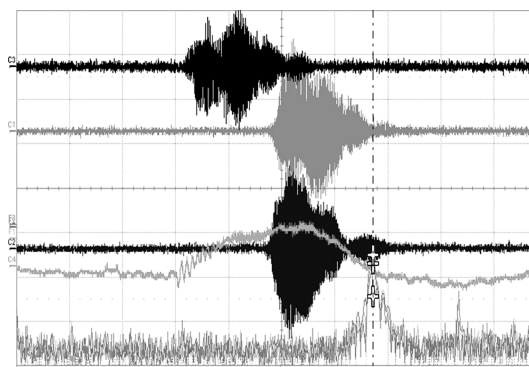


图 11 高阶模抑制型 MILO 典型实验波形

5 结论

通过分析 MILO 慢波结构基模与高阶模式高频场分布, 提出了高阶模抑制型 MILO 器件. 数值模拟及实验研究结果表明, 高阶模抑制型 MILO 能够成功抑制高阶模式产生, 使器件稳定工作在基模. 运用这一新方法可以有效解决 MILO 实验研究中经常遇到的高阶模式竞争问题, 降低了对器件同心度及阴极发射材料均匀性的要求. 在 MILO 器件研究中具有广泛的应用前景.

[1] Lemke R W, Clark M C 1987 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **62** 3436
 [2] Haworth M D, Luginsland J W, Lemke R W 2001 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29** 388

[3] Chen D B, Fan Z K, Dong Z W 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 820 (in Chinese) [陈代兵, 范植开, 王冬 2007 强激光与粒子束 **19** 820]

- [4] Fan Y W, Yuan C W, Zhong H H *Simulation Investigation of an Improved MILO. IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 35, No. 2, Apr. 2007
- [5] Cousin R, Larour J, Gardelle J 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol. 35, No. 5
- [6] Sun H F, Dong Z W 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 641 (in Chinese) [孙会芳, 董志伟 2008 强激光与粒子束 **20** 641]
- [7] Sun H F, Dong Z W 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 303 (in Chinese) [孙会芳, 董志伟 2010 强激光与粒子束 **22** 303]
- [8] Wang D, Chen D B, Fan Z K 2008 *Acta Phys. Sin* **57** 4875 (in Chinese) [王冬, 陈代兵, 范植开 2008 物理学报 **57** 4875]
- [9] Wang D, Chen D B, Qin F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4281
- [10] Qin F, Wang D, Wen J, Chen D B, Fan Z K 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 545
- [11] Qin F, Wang D, Chen D B, Fan Z K 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 1921
- [12] Wang D, Chen D B, Qin F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6962 (in Chinese) [王冬, 陈代兵, 范植开 2009 物理学报 **58** 6962]

Investigation of L-band higher order depressed magnetically insulated transmission line oscillator*

Qin Fen[†] Wang Dong Chen Dai-Bing Wen Jie

(Key Laboratory of High Power Microwave Technology, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 19 May 2011; revised manuscript received 10 September 2011)

Abstract

A novel higher order mode depressed L-band magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) device is put forward by destroying the π -mode oscillating condition of HEM_{11} mode. High frequency analysis and PIC simulation are carried out. The simulation results reveal that the novel MILO device oscillates in TM_{00} mode and successfully suppresses the higher order HEM_{11} mode generation. Contrastive experiments are carried out. Purified 1.3 GHz microwave obtains a corresponding fundamental mode oscillation in higher order depressed MILO in contrast with original MILO which obtains a 1.42 GHz microwave output.

Keywords: MILO, fundamental mode, HEM_{11} mode, high power microwave

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 41.60.Bq, 52.59.Ye

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China and the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2010B0402060).

[†] E-mail: qinfen@mail,ustc.edu.cn