

## 磁绝缘线振荡器中模式竞争的物理分析和数值模拟

杨温渊 董烨 孙会芳 董志伟

## Competitions among modes in magnetically insulated transmission line oscillator

Yang Wen-Yuan Dong Ye Sun Hui-Fang Dong Zhi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 198401 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200383

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200383>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

数值孔径对掺镱光纤振荡器模式不稳定阈值影响的实验研究

Experimental study on influence of fiber numerical aperture on mode instability threshold of ytterbium fiber oscillator

物理学报. 2019, 68(11): 114206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182257>

非平衡感应耦合等离子体流场与电磁场作用机理的数值模拟

Numerical investigation on interaction mechanisms between flow field and electromagnetic field for nonequilibrium inductively coupled plasma

物理学报. 2019, 68(18): 185202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190865>

气力提升系统气液两相流数值模拟分析

Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in gas lift system

物理学报. 2020, 69(6): 064705 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191755>

三维电磁扩散场数值模拟及磁化效应的影响

Three-dimensional numerical simulation of electromagnetic diffusion problem and magnetization effects

物理学报. 2019, 68(3): 030201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181567>

离轴抽运厄米-高斯模固体激光器

Off-axis pumped Hermite-Gaussian mode solid-state laser

物理学报. 2020, 69(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200086>

化学复合率对激发赤道等离子体泡影响的数值模拟

Numerical simulation of recombination rate effect on development of equatorial plasma bubbles

物理学报. 2019, 68(19): 199401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190173>

# 磁绝缘线振荡器中模式竞争的物理分析和数值模拟<sup>\*</sup>

杨温渊<sup>†</sup> 董烨 孙会芳 董志伟

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2020 年 3 月 14 日收到; 2020 年 5 月 24 日收到修改稿)

作为一种紧凑型高功率微波器件, 磁绝缘线振荡器在起振过程中容易出现模式竞争现象, 如果不能对其进行有效抑制, 可能导致器件的最终输出性能下降. 由于磁绝缘线振荡器中波束相互作用区通常采用同轴盘荷波导作为其慢波结构, 因此本文从同轴盘荷波导中几个可能被相对论电子束激发的低阶本征模与电子束之间的色散关系入手, 分析了三种类型的模式竞争的特点、产生的可能原因以及削弱方法. 基于以上分析, 给出了一种高功率紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的物理模型, 并利用全电磁三维粒子程序对其进行了冷腔和热腔的数值模拟. 结果表明, 由于结构不完全对称和电子发射可能存在一定的非均匀性, 器件运行初期相互作用区有竞争模式  $\text{HEM}_{11}$  模出现, 与理论分析一致; 起振一小段时间后 (10 ns 左右), 相互作用区基模增长加快, 高阶模被抑制. 进一步优化后器件在基模获得了高效率和高功率微波输出, 饱和时输出功率约为 8.1 GW, 输出效率达到了 18%, 模式纯度约为 97%. 本文研究结果可为磁绝缘线振荡器运行过程中出现的竞争模式的识别和输出性能优化提供理论参考和依据.

**关键词:** 磁绝缘线振荡器, 模式竞争, 数值模拟

**PACS:** 84.40.Fe, 07.57.Hm, 84.40.Az

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200383

## 1 引言

磁绝缘线振荡器 (magnetically insulated transmission line oscillator, MILO) 是一种紧凑型高功率微波器件, 它不需要外加引导磁场聚焦电子束, 输出功率可达吉瓦量级, 在许多领域有着良好的应用前景<sup>[1]</sup>. 为进一步提高 MILO 输出性能, 如提高其输出功率和效率, 增加模式稳定性等, 研究人员一直在进行相关研究和探索<sup>[2–21]</sup>.

为了获得高效稳定的高功率微波输出, MILO 工作点一般设计在基模 ( $\text{TM}_{00}$  模) 的  $\pi$  模, 但器件运行初期仍然容易有不同程度的模式竞争

现象出现<sup>[11–21]</sup>. 由于 MILO 中波束相互作用区通常采用同轴盘荷波导作为其慢波结构, 因此, 从同轴盘荷波导中几个可能被相对论电子束激发的低阶模式 ( $\text{TM}_{00}$ ,  $\text{TM}_{01}$  和  $\text{HEM}_{11}$  模) 与电子束之间的色散关系入手, 简要分析了三种类型的模式竞争的特点、产生的可能原因以及削弱方法, 具体包括基模  $\text{TM}_{00}$  模相邻纵向模式之间的竞争、高阶对称模  $\text{TM}_{01}$  与基模之间的竞争以及非对称模式  $\text{HEM}_{11}$  与基模之间的竞争, 为磁绝缘线振荡器运行过程中出现的竞争模式的识别和输出性能的优化提供参考. 在此基础上, 给出了一种稳定紧凑型 L 波段 MILO 的物理模型并利用全电磁三维粒子程序进行了数值模拟, 重点对起振阶段的模式竞争问题进行了分析.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 11875094) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yang\_wenyuan@iapcm.ac.cn

## 2 MILO 中模式竞争的物理分析

由于 MILO 中波束相互作用区通常采用同轴盘荷波导作为其慢波结构, 下面从同轴盘荷波导中几个可能被电子束激发的低阶模式与电子束之间的色散关系入手, 对 MILO 中模式竞争问题进行物理分析.

同轴盘荷波导的纵向中心截面 (即过轴线的纵向截面, 以下简称纵向截面) 和横截面如图 1 所示, 包括阴极、阳极叶片和阳极外壳, 它们均为金属导体, 其中  $p$  为慢波结构的周期长度, 整个结构为轴对称的圆柱结构.

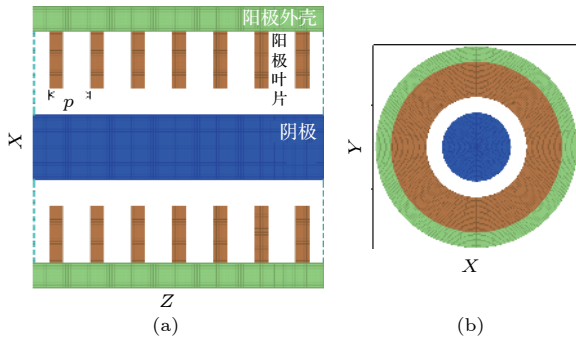


图 1 同轴盘荷波导的结构示意图 (a) 纵向中心截面; (b) 横截面

Fig. 1. Schematic drawings of the coaxial disk-loaded waveguide in (a) Axial and (b) radial cross section.

利用电磁场模拟程序, 计算了上述同轴盘荷波导中  $TM_{00}$  模、 $TM_{01}$  模和  $HEM_{11}$  模的色散曲线, 具体计算方法可参考文献 [4,20,22], 其中阴极半径为 4.0 cm, 阳极叶片和阳极外壳的内半径分别为 6.0 cm 和 10.0 cm, 周期长度  $p$  为 3.0 cm, 电子束电压为 500 kV, 具体结果如图 2 所示. 图 2 中还给出了电子束和真空中光束的色散曲线,  $v_e$  和  $v_{drift}$  分别为电子可能达到的最大速度和达到磁绝缘时的漂移速度. 图 2 中 A, B 和 C 所对应的点分别为电子束与  $TM_{00}$  模、 $HEM_{11}$  模和  $TM_{01}$  模色散曲线的交点. MILO 工作点一般设计在基模 ( $TM_{00}$  模) 的  $\pi$  模, 即点 A 处, 对应的纵向电场在纵向和横向截面分布的等高图如图 3(a) 和图 3(b) 所示.

### 2.1 基模 $TM_{00}$ 不同纵向模式的竞争

对于来自基模 ( $TM_{00}$ ) 非  $\pi$  模的竞争, 由图 2 可以看到, 可能参与竞争的纵向模式一般是与

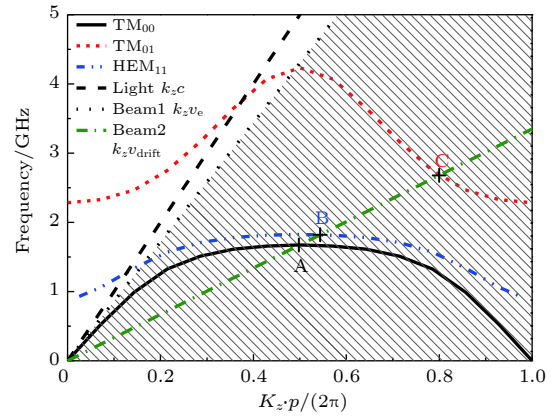


图 2 同轴盘荷波导中  $TM_{00}$  模、 $TM_{01}$  模、 $HEM_{11}$  模以及电子束和光束的色散关系图

Fig. 2. The uncoupled dispersion curves of the coaxial disk-loaded waveguide ( $TM_{00}$ ,  $TM_{01}$  and  $HEM_{11}$ ), and the dispersion lines of the electron and light beam.

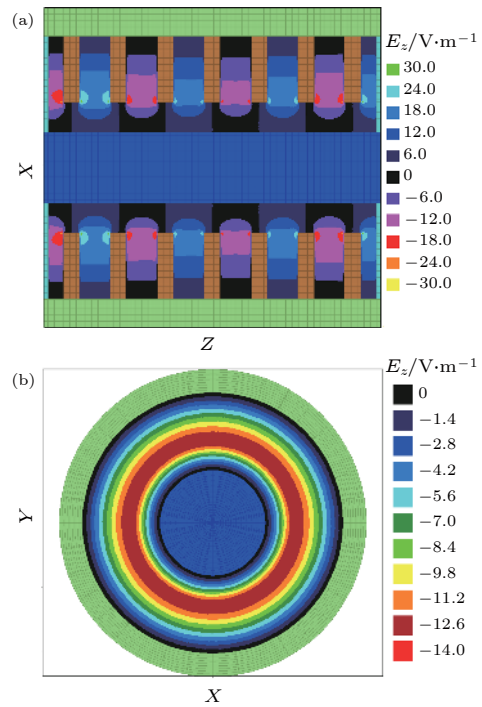


图 3 同轴盘荷波导中  $TM_{00}(\pi$  模) 的轴向电场在 (a) 纵向中心截面和 (b) 横截面的等高图

Fig. 3. The contour plots of  $E_z$  of the  $TM_{00}(\pi$  mode) in the coaxial disk-loaded waveguide in the (a) Axial and (b) radial cross section.

$\pi$  模 (点 A) 较接近的模式, 如  $(N-1)\pi/N$ ,  $N$  为相互作用区阳极腔的个数, 即慢波结构的周期数. 由于是基模之间的竞争, 因此竞争模式的电磁场分布仍然具有轴对称性 (图 3(b)), 共振频率略低于工作点  $\pi$  模对应的频率. 该竞争模式初期可能先于  $\pi$  模被激发, 一段时间后, 可能被  $\pi$  模抑制.

已经知道, 在 MILO 中, 从阴极发射的电子束

的能量分配到了径向和轴向两个方向. MILO 设计时, 要求电子的平均漂移速度约等于基模  $TM_{00}$  模的相速度. 但由于电子的动能与径向位置相关, 因此, 磁绝缘尚未完全形成前, 电子速度沿径向连续变化, 电子束色散线可扫过如图 2 的阴影部分 [15,16]. 电子束色散线与  $TM_{00}$  模的色散曲线将产生一系列交点, 从而可能激发起  $TM_{00}$  模的含  $\pi$  模在内的其他纵向模式.  $TM_{00}$  模的纵向模式之间的竞争已经在实验上观察到且被证实 [17,18].

通过合理选取阳极腔的个数来控制模式隔离度, 或者选取合适的阳极叶片半径, 尤其是提取腔叶片的半径来调整束波相互作用腔的品质因数, 可以削弱或者抑制  $TM_{00}$  模的纵向模式之间的竞争.

## 2.2 高阶模 $TM_{01}$ 与基模的竞争

对于基模与高阶模  $TM_{01}$  之间的竞争, 此时竞争模式  $TM_{01}$  的电磁场分布也具有轴对称性, 只是轴向电场沿径向正负交替一次, 如图 4 所示. 由色散关系图 2 可以看到, 点  $C$  为电子束和  $TM_{01}$  模色散曲线的交点, 其对应的共振频率远高于点  $A$  对应的频率, 且交点位置随电子束纵向速度 (电压) 变化相对较为敏感, 因此激发难度相对较大. 但由于此时束波共振点对应的本征模的群速度小于零, 如果器件品质因数较高或者相互作用区较长, 器件运行初期有可能被激发.

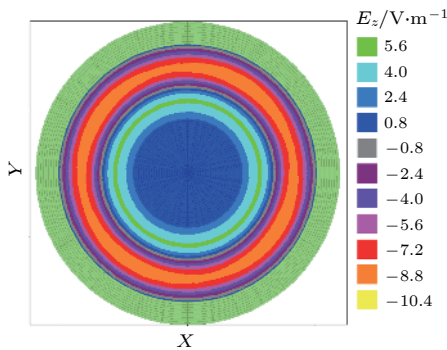


图 4 同轴盘荷波导中  $TM_{01}$  的轴向电场在横截面的等高图  
Fig. 4. The contour plots of  $E_z$  of the  $TM_{01}$  mode in the coaxial disk-loaded waveguide in the radial cross section.

通过调节阳极叶片的半径进而降低束波相互作用腔的品质因数, 或者通过增加负载电流强度缩短 MILO 达到磁绝缘状态的时间, 都可能有效抑制  $TM_{01}$  模式的起振和放大.

## 2.3 非对称模式 $HEM_{11}$ 模与基模的竞争

对于非对称模式  $HEM_{11}$  模与基模的竞争, 由图 2 可以看到,  $HEM_{11}$  各纵向模式的频率仅略高于与之对应的  $TM_{00}$  模的频率,  $\pi$  模附近的频率相差最小 (图中点  $A$  和点  $B$ ). 其中,  $HEM_{11}$  模在点  $B$  处对应的纵向电场在纵向和横向截面分布的等高图如图 5(a) 和图 5(b) 所示. 可以看到,  $HEM_{11}$  模的轴向电场  $E_z$  不再具有轴对称性, 而是沿角向正负交替一次.

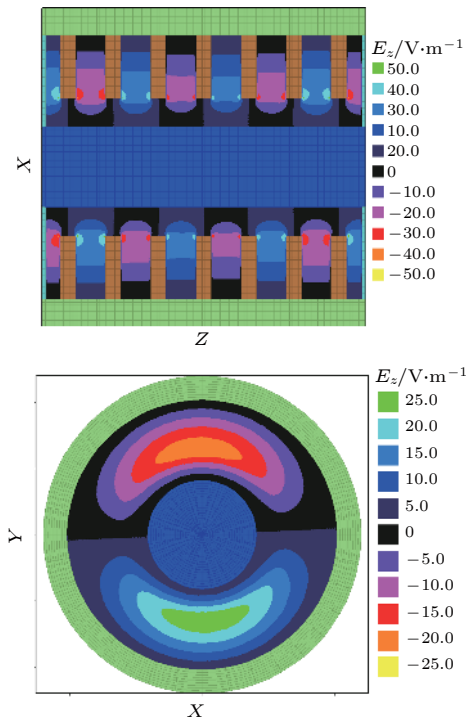


图 5 同轴盘荷波导中  $HEM_{11}(\pi)$  模的轴向电场在 (a) 纵向中心截面和 (b) 横截面的等高图

Fig. 5. The contour plots of  $E_z$  of the  $HEM_{11}(\pi)$  mode in the coaxial disk-loaded waveguide in the (a) Axial and (b) radial cross section.

已有研究表明: 任何小的结构非对称或者电子发射的非均匀, 都可能在器件运行初期激发  $HEM_{11}$  模, 且起振较快, 在器件运行初期很难完全抑制 [19–21]. 由于 MILO 慢波结构包括反射区、相互作用区和提取输出区, 在这些区域, 阳极叶片半径各有差异, 加上输出区还有支撑杆, 导致与  $TM_{00}$  模的频率接近的  $HEM_{11}$  模容易被激发.

尽量保证器件结构的对称性和阴极电子发射的均匀性, 尽管不能够完全消除这种竞争模式, 但可以最大程度地缩短模式竞争的时间和减小竞争模式的强度.



### 3 紧凑型 L 波段 MILO 中模式竞争的模拟和分析

为了获得稳定的高功率微波输出, 基于以上分析和认识, 结合已有工作基础<sup>[3-6,13,14]</sup>, 设计了一种紧凑型 L 波段 MILO, 其结构示意图如图 6 所示, 除支撑杆沿角向以  $90^\circ$  夹角均匀排列外, 整个结构为轴对称结构, 其中波束相互作用区采用的慢波结构为前面部分讨论过的同轴盘荷波导, 点 D 为后面的模拟计算中在相互作用区中设置的观察点. 下面我们对上述 MILO 中的模式竞争问题和其输出特性进行模拟和分析.

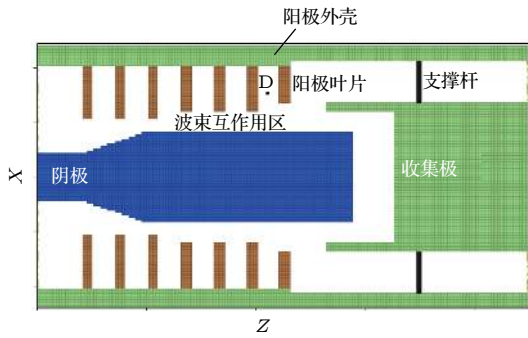


图 6 紧凑型 MILO 纵向截面示意图

Fig. 6. Schematic drawing of the compact MILO in the axial cross section.

#### 3.1 冷腔模拟和分析

为了计算波束相互作用区中的共振频率, 将上述 MILO 的相互作用区两端封闭, 同时沿  $z$  方向在第四和第五叶片之间加载一个短脉冲宽频信号来激励电磁场振荡. 图 7 给出了上述激励信号在 MILO 相互作用区中点 D 的位置激发出的电场频谱图. 由图 7 可以看到: 在容易被激发的频率中, 较低的两个频率分别为 1.61 和 1.77 GHz.

图 8(a)、图 8(b) 和图 9(a)、图 9(b) 分别给出了频率分别为 1.61 和 1.77 GHz 时对应的纵向电场在  $XZ$  和  $XY$  两个截面分布的等高图. 结合前面的分析, 可知这两个频率对应的电磁场模式分别

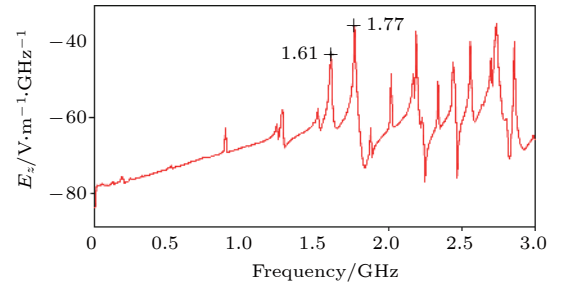


图 7 短脉冲宽频信号激发后 MILO 相互作用区中点 D 处电场的频谱图

Fig. 7. The oscillation frequency of the  $E_z$  stimulated in cold cavity at point D.

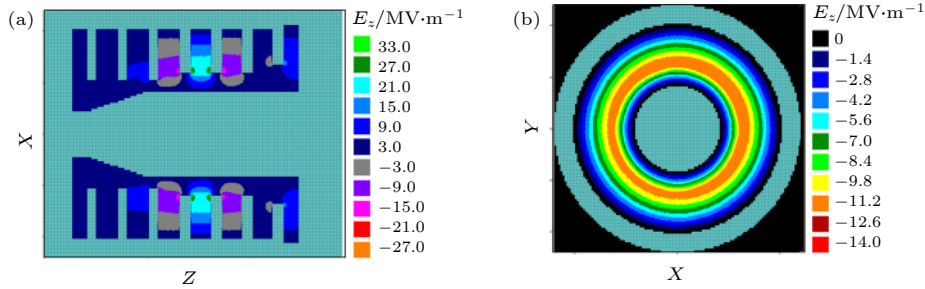


图 8 频率为 1.61 GHz 的纵向电场在 (a) 纵向和 (b) 横向截面等高图

Fig. 8. The contour plots of  $E_z$  with the frequency of 1.61 GHz in (a) The axial and (b) the radial cross section.

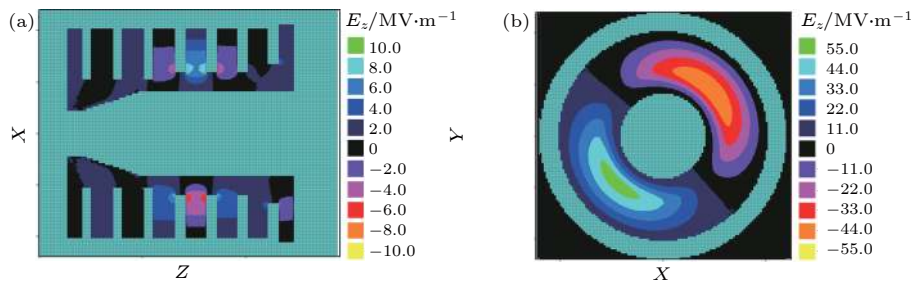


图 9 频率为 1.77 GHz 的纵向电场在 (a) 纵向和 (b) 横向截面的等高图

Fig. 9. The contour plots of  $E_z$  with the frequency of 1.77 GHz in (a) The axial and (b) the radial cross section.

是  $TM_{00}$  模和  $HEM_{11}$  模的  $\pi$  模. 由此可见, 与基模  $TM_{00}$  模相同, 对于  $HEM_{11}$  模, 与电子束容易产生相互作用的模式也是  $\pi$  模.

### 3.2 热腔的数值模拟及物理分析

下面, 我们利用全电磁三维粒子模拟程序对给出的如图 6 所示的 L 波段 MILO 的输出性能进行数值模拟, 同时考察初始阶段的模式竞争情况, 其中注入的电子束的平均电压约为 510 kV, 对应的电功率约为 32.8 GW.

图 10(a)—(d) 和图 11(a)—(d) 给出了阳极腔

内  $D$  点电场和磁场随时间的变化曲线及针对不同时段的 FFT 变换图. 由图 10(a) 和 11(a) 可以看到, 辐射场 8.0 ns 左右开始起振, 大约 22.0 ns 达到饱和, 其中在 8.0 至 14.0 ns 之间, 存在一个小的峰值. 对电磁场按时间分段做 FFT 变换, 可以得到, 全时段 (0—50 ns) 的电磁场的中心频率约为 1.6 GHz, 但是可以看到有略高于该频率的小峰值, 提示有一定强度的竞争模式; 初期 (8—14 ns) 的电磁场的频率约为 1.7 GHz, 稳定后 ( $> 14$  ns), 电磁场的频率约为 1.6 GHz, 频谱比较纯, 略高于该频率的小峰值没有出现. 可见, 在起振后的初始阶段, 存在

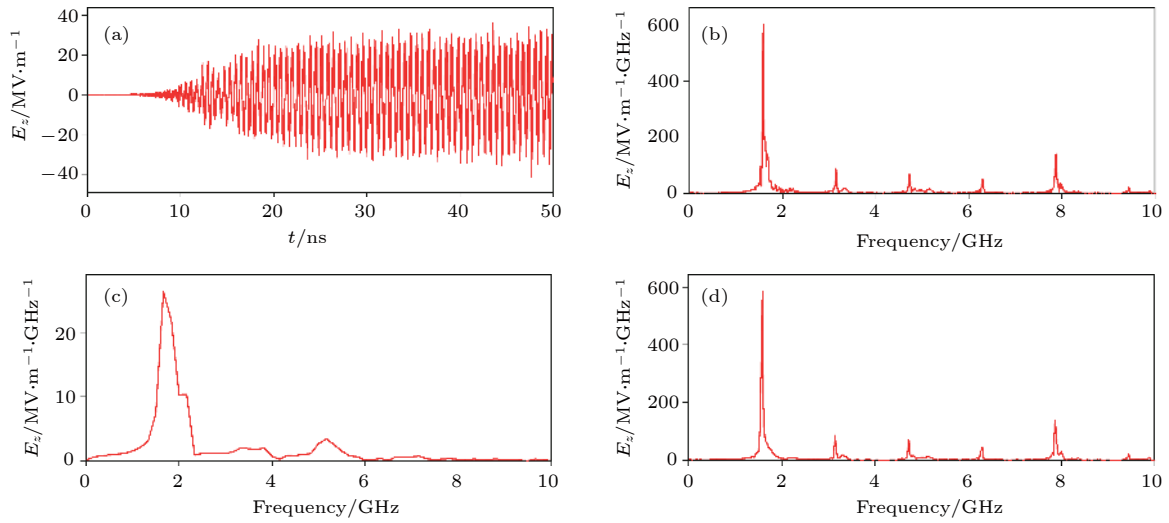


图 10 (a) 阳极腔内观察点  $D$  的电场  $E_z$  随时间的变化曲线及不同时间窗口 (b) 0—50 ns, (c) 8—14 ns 和 (d) 14—50 ns 的 FFT 变换图

Fig. 10. (a) Variations of  $E_z$  with time at the observation point  $D$  in the anode cavity; the corresponding Fourier transform with different time intervals: (b) 0—50 ns; (c) 8—14 ns; (d) 14—50 ns.

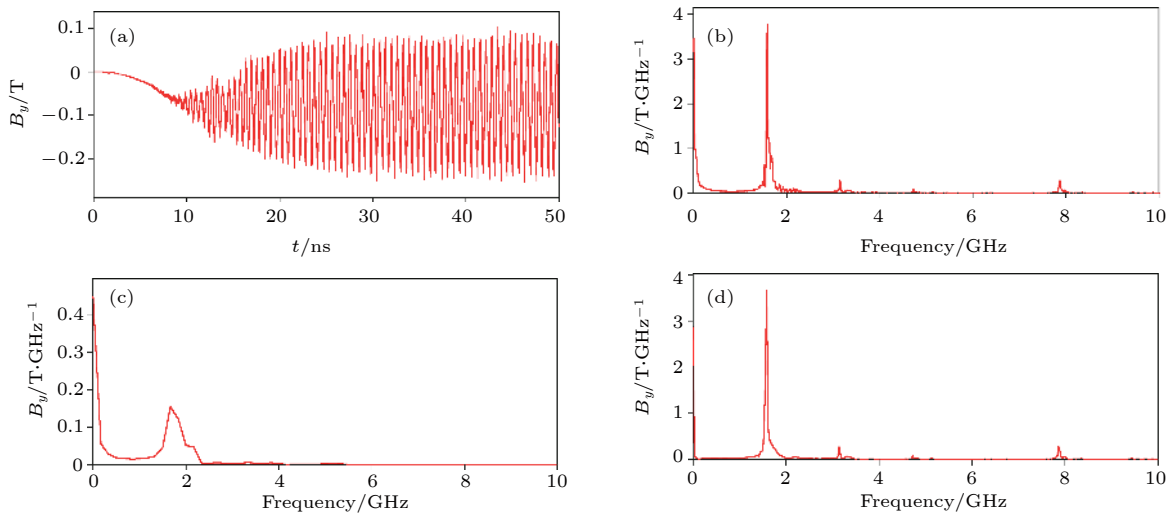


图 11 (a) 阳极腔内观察点  $D$  磁场  $B_y$  随时间的变化曲线及不同时间窗口 (b) 0—50 ns, (c) 8—14 ns 和 (d) 14—50 ns 的 FFT 变换图

Fig. 11. (a) Variations of  $B_y$  with time at the observation point  $D$  in the anode cavity, and the corresponding Fourier transform with different time intervals: (b) 0—50 ns, (c) 8—14 ns (d) 14—50 ns.

明显的模式竞争; 大约过 10 ns 左右, 竞争模式被抑制.

图 12(a)—(d) 给出了初始阶段不同时刻相互作用区  $D$  点所在横截面轴向电场的等高图. 可以看到, 轴向电场沿角向的分布由初期的非轴对称分布, 逐渐转变为轴对称分布. 由轴向电场的分布特征和共振频率, 结合冷腔计算结果, 可以确定, 在初始阶段, 非对称模式  $\text{HEM}_{11}$  模与  $\text{TM}_{00}$  模产生竞争; 由于加载了电子束, 因此与冷腔分析时的结果进行比较,  $\text{TM}_{00}$  模和  $\text{HEM}_{11}$  模的频率由冷腔时的 1.61 和 1.77 GHz 分别降为 1.6 和 1.7 GHz.

由图 13(a) 和图 13(b) 给出了饱和时相互作用区中轴向电场在纵向和横向截面的等高图, 可以看

到, 饱和时轴向电场在相互作用区的阳极腔中正负交替排列 ( $\pi$  模场分布), 沿角向呈轴对称分布, 与  $\text{TM}_{00}$  模的场分布完全一致, 因此, 可以确定器件稳定后相互作用区的工作模式为  $\text{TM}_{00}$  模的  $\pi$  模.

由于是在直角坐标系中建立的三维计算模型, 加上输出区还有支撑杆, 因此相互作用区很难实现完全轴对称. 同时, 由于阴极电子发射面大, 电子发射也存在一定的非均匀性, 这些因素使得器件运行初期容易激发  $\text{HEM}_{11}$  模, 且很难完全抑制. 起振一小段时间后 (10 ns 左右), 相互作用区基模增长加快, 高阶模被抑制.

基于以上分析, 为了提高器件的输出功率和效率, 对器件的参数进行了进一步的优化, 主要调节

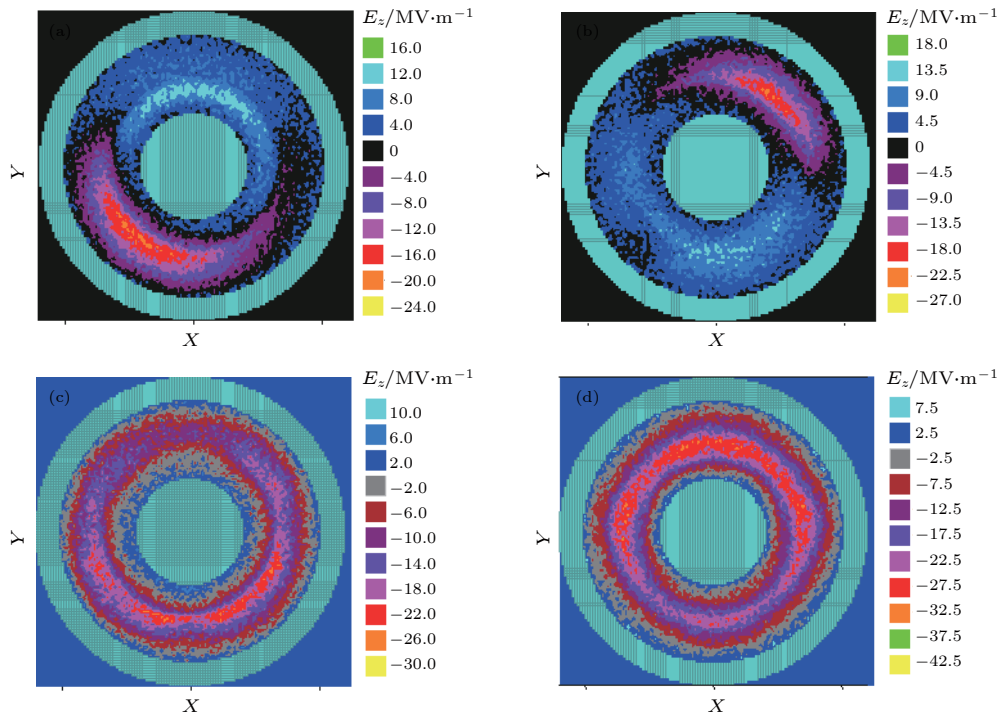


图 12 初始阶段不同时刻相互作用区横截面轴向电场的等高图 (a)  $t = 12.171$  ns; (b)  $t = 13.094$  ns; (c)  $t = 14.944$  ns; (d)  $t = 16.793$  ns

Fig. 12. Contour plots of  $E_z$  in the interaction region at different times at the initial stage.

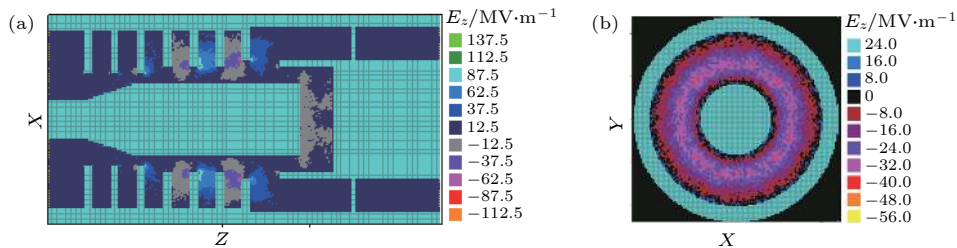


图 13 饱和时相互作用区轴向电场在 (a) 纵向截面和 (b) 横向截面的等高图,  $t = 45.727$  ns

Fig. 13. Contour plots of  $E_z$  in the (a) Axial and (b) radial cross section in the interaction region at saturation.

了相互作用区的周期长度和电子束电压, 其他参数保持不变. 模拟结果表明, 当周期长度  $p$  为 3.1 cm, 注入的电子束的平均电压约为 600 kV, 对应电功率约为 45 GW 时, 器件的输出效率达到了 18%.

图 14(a) 和图 14(b) 给出了 MILO 输出周期平均功率随时间的变化曲线以及稳定后输出电场的 FFT 变换图. 由图 14 可以看到, 饱和时输出功率高达 8.1 GW, 输出频谱比较纯, 中心频率约为 1.552 GHz. 由于 MILO 的输出区为同轴波导, 输出模式应为同轴 TEM 模. 图 15(a) 和图 15(b) 给出了输出横截面电磁场分布的箭头图, 可以看到, 计算所得的电磁场分布确与理想同轴 TEM 模的分布一致. 利用文献 [23] 给出的方法, 计算得到了模式纯度约为 97%.

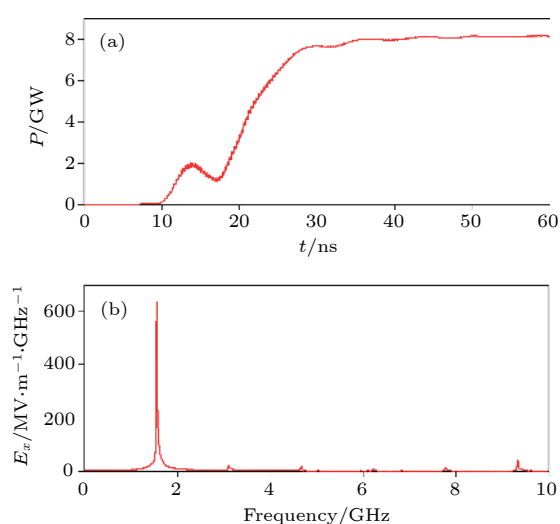


图 14 (a) MILO 输出周期平均功率随时间的变化曲线; (b) 稳定后输出电场的 FFT 变换图

Fig. 14. (a) Time plots of the periodic-average output power of the MILO; (b) the Fourier transform of  $E_x$  at the output port.

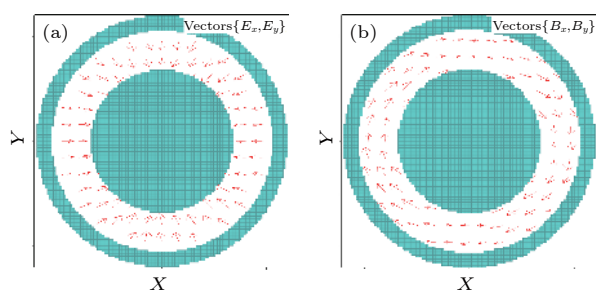


图 15 电磁场在输出横截面分布的箭头图 (a) 电场; (b) 磁场

Fig. 15. The vector plots of the (a) Electric field and (b) magnetic field in the radial cross section at the output port.

## 4 结 语

从同轴盘荷波导中几种可能被电子束激发的低阶模式 ( $TM_{00}$ ,  $TM_{01}$  和  $HEM_{11}$  模) 的色散曲线与电子束色散曲线关系入手, 简要分析了三种类型的模式竞争的特点和产生的可能原因以及削弱方法, 具体包括基模  $TM_{00}$  模相邻纵向模式之间的竞争、高阶对称模  $TM_{01}$  与基模之间的竞争以及非对称模  $HEM_{11}$  与基模之间的竞争. 在此基础上, 给出了一种稳定紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器的物理模型, 并利用全电磁三维粒子程序对其中的模式竞争问题进行了数值模拟. 冷腔分析表明: 在容易被激发的本征模式中, 对应频率较低的模式分别是  $TM_{00}$  和  $HEM_{11}$  的  $\pi$  模, 对应的频率分别为 1.61 GHz 和 1.77 GHz. 热腔的模拟结果表明, 该器件运行初期主要竞争模式是  $HEM_{11}$  模, 起振约十个 ns 后, 竞争模式基本被抑制. 进一步优化后器件在基模获得了高效率和高功率微波输出, 饱和时输出功率约 8.1 GW, 输出效率达到了 18%, 模式纯度约为 97%. 研究结果可为磁绝缘线振荡器运行过程中出现的竞争模式的识别和输出性能优化提供理论参考和依据. 下一步将在控制好模式竞争的基础上改进和优化器件结构, 以进一步提高器件的输出功率和效率.

## 参考文献

- [1] Barker R J, Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwaves Sources and Technologies* (New York: Institute of Electrical and Electronic Engineer, Inc.) pp43–53
- [2] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 698
- [3] Lemke R W, Calico S E, Clark M C 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 364
- [4] Yang W Y 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2801
- [5] Fan Y W, Li S R, Wang X Y, Li A K, Yu Y Q, Liu Z Y 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 044704
- [6] Dong Z W, Sun H F, Yang Y L, Yang W Y, Zhou Q H, Zhang F, Dong Y 2016 *High Pow. Las. Part. Beam.* **28** 033023 (in Chinese) [董志伟, 孙会芳, 杨郁林, 杨温渊, 周前红, 张芳, 董烨 2016 *强激光与粒子束* **28** 033023]
- [7] Wang X Y, Fan Y W, Shu T, Li A K, Yu Y Q, Liu Z Y 2019 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47** 3974
- [8] Nallasamy V, Datta S K, Reddy S U, Jain P K 2017 *J. Electromagn. Waves Appl.* **31** 1864
- [9] Kumar A, Dwivedi S, Jain P K 2019 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47** 4642
- [10] Kim D H, Jung H C, Min S H, Shin S H, Rhee M J, Park G S, Kim C H, Yim D W 2006 *7th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)/6th IEEE International*



- Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)* Monterey, CA, April 25–27, 2006 p352
- [11] Dixit G, Kumar A, Jain P K 2017 *Phys. Plasma*. **24** 013113
  - [12] Nallasamy V, Narasimhamurthy C, Geetha B, Gupta S K, Datta S K, Reddy S U, Jain P K 2017 *J. Electromagn. Waves Appl.* **31** 375
  - [13] Qin F, Wang D, Xu S, Zhang Y, Fan Z K 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 044703
  - [14] Sun H F, Dong Z W, Yang Y L 2010 *High Pow. Las. Part. Beam.* **22** 303 (in Chinese) [孙会芳, 董志伟, 杨郁林 2010 强激光与粒子束 **22** 303]
  - [15] Kim D H, Jung H C, Min S H, Shin S H, Park G S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 124103
  - [16] Lemke R W 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 1089
  - [17] Cousin R, Larour J, Gardelle J, Cassany B, Modin P, Gouard P, Raymond P 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 1467
  - [18] Cousin R, Larour J, Gouard P, Raymond P 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 084512
  - [19] Wang D, Chen D B, Fan Z K, Deng J K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4875 (in Chinese) [王冬, 陈代兵, 范植开, 邓景康 2008 物理学报 **57** 4875]
  - [20] Jiang T, Zhang J D, He J T, Li Z Q, Ling J P 2016 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44** 755
  - [21] Qin F, Wang D, Chen D B, Wen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094101 (in Chinese) [秦奋, 王冬, 陈代兵, 文杰 2012 物理学报 **61** 094101]
  - [22] Dong Y, Dong Z W, Yang W Y, Zhou H J 2009 *High Pow. Las. Part. Beam.* **21** 1199 (in Chinese) [董烨, 董志伟, 杨温渊, 周海京 2009 强激光与粒子束 **21** 1199]
  - [23] Jiang L H, Li H, Wu Z W 2014 *High Pow. Las. Part. Beam.* **26** 063009 (in Chinese) [姜利辉, 李浩, 吴泽威 2014 强激光与粒子束 **26** 063009]

# Competitions among modes in magnetically insulated transmission line oscillator<sup>\*</sup>

Yang Wen-Yuan<sup>†</sup> Dong Ye Sun Hui-Fang Dong Zhi-Wei

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

( Received 14 March 2020; revised manuscript received 24 May 2020 )

## Abstract

As a compact and high power microwave source, the competitions among various modes are prone to appear in the initial stage of the development of the radiated electromagnetic field in a magnetically insulated transmission line oscillator (MILO). If the mode competitions are not controlled effectively, the output characteristics of the MILO may decline in the end.

As is well known, the operating mode of MILO is generally designed on the  $\pi$  mode of the  $TM_{00}$  mode and the coaxial disk-loaded waveguide is usually adopted as a slow-wave structure for beam-wave interaction in MILO. Therefore from the dispersion relations between the electron beam and the lower order electromagnetic modes (including  $TM_{00}$ ,  $TM_{01}$  and  $HEM_{11}$  modes) in the slow-wave structure, the characteristics and possible suppression methods of the three kinds of mode competitions are analyzed simply. The first kind mode competition is between the different axial modes of the fundamental  $TM_{00}$  mode. In this case, the electromagnetic field of the competition mode is also axially symmetric and its frequency is slightly lower than that of the  $\pi$  mode. The second is the competition between the  $TM_{00}$  and higher order  $TM_{01}$  mode. In this case, the competition frequency is rather higher than that of the  $\pi$  mode ( $TM_{00}$ ). The third is the competitions between the  $TM_{00}$  and low order asymmetric  $HEM_{11}$  modes. In this case, the competition frequency is slightly higher than that of the main mode. Appropriately choosing the radii of the anode vanes, the number of the anode cavity and the load length of the cathode, the corresponding mode competition intensity can be weakened.

Based on the obtained results above and the existing model of the MILO, a compact high output power L-band MILO is proposed. Numerical studies of the mode competitions and output characteristics are carried by using the three dimensional particle-in-cell code. Cold-cavity test shows that in the low frequency range, the easily stimulated electromagnetic modes are the  $\pi$  mode of  $TM_{00}$  and  $HEM_{11}$  modes with frequencies of 1.61 GHz and 1.77 GHz, respectively. The numerical results of hot-cavity verify that the competition in the initial stage comes mainly from the asymmetric  $HEM_{11}$  mode due to the fact that there exists the strut in the output region, the Cartesian coordinates are adopted during the simulation, and totally symmetry cannot be guaranteed. In addition, electron beam emission from the cathode is not ideally even. But stable and high output microwave power is obtained in the end in the L-band MILO by being optimized. The output power and efficiency are 8.1 GW and 18% respectively, and the mode purity reaches about 97%.

**Keywords:** magnetically insulated transmission line oscillator, mode competition, numerical simulation

**PACS:** 84.40.Fe, 07.57.Hm, 84.40.Az

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200383

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875094).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yang\_wenyuan@iapcm.ac.cn