

品质因数对 TM_{02} 模相对论返波管工作模式影响*

李雨晴¹⁾ 王洪广¹⁾ 翟永贵^{1)†} 杨文晋¹⁾ 王玥¹⁾
李韵²⁾ 李永东¹⁾

1) (西安交通大学电子与信息学部, 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (西安空间无线电技术研究所, 西安 710100)

(2023 年 9 月 27 日收到; 2023 年 10 月 20 日收到修改稿)

结合理论分析和数值模拟, 研究了 TM_{02} 模过模结构相对论返波管的模式竞争机制. 理论推导得到波纹波导中混合模式与圆波导中对应模式的近似关系, 以近似模式作为波导输入来计算包含的高频结构 S_{11} 参数曲线, 分析各模式的品质因数. 三维粒子模拟结果显示, 当 TM_{02} 模式的耦合阻抗优势明显时, 束波作用点基本不受两端反射影响, 输出的其他模式微波主要是由互作用模式转换而来; 当耦合阻抗优势不明显时, 品质因数的改变会影响束波相互作用, 起振模式随之变化. 各模式群速度接近时, 谐振对工作模式的影响的实质是末端反射主导下的品质因数对模式的影响. 品质因数和耦合阻抗对返波管工作模式的共同作用为在输出模式稳定的前提下优化输出功率、降低磁场提供了更大空间, 使用多目标优化设计算法对相对论返波管进行优化, 最终三维模拟得到的返波管输出功率达到 534 MW, TM_{02} 模式输出功率占比 94.95%.

关键词: 相对论返波管, 模式竞争, 非轴对称模式, 粒子模拟

PACS: 52.65.Rr, 84.40.Fe, 84.30.Ng

DOI: 10.7498/aps.73.20231577

1 引言

高功率微波 (high power microwave, HPM) 一般指频率 1—300 GHz, 平均功率大于 1 MW 或峰值功率大于 100 MW 的电磁辐射^[1]. 相对论返波管 (relativistic backward wave oscillator, RBWO) 作为一种典型的高功率微波源, 具有高输出功率、高转换效率和适合重复频率工作等优势. 在高频 RBWO 中容易产生射频击穿和脉冲缩短等问题, 采用过模结构^[2,3]是解决这些问题的有效手段. 但过模结构的半径大, 允许存在的电磁波模式数量更多, 包括轴对称模式与非轴对称模式, 这些模式可

能与工作模式发生竞争, 造成频谱不纯、功率下降等问题. 非轴对称模式与轴对称电子束的能量交换效率极低, 器件工作于 TM_{02} , TM_{03} 等轴对称的高阶模式^[4-7]可以提高功率容量, 因此本研究以 TM_{02} 模式作为工作模式. 由于高功率微波源实验研究成本高、周期长, 粒子模拟 (particle-in-cell, PIC) 成为了器件设计与分析的常用手段. 二维 PIC 模拟只能研究轴对称模式, 但计算速度快; 三维 PIC 模拟则可以有效模拟非轴对称模式对器件工作状态的影响, 与实验更为接近, 但缺点是计算速度慢. 两者可以结合, 用于器件优化和分析.

束波作用点的群速度对模式竞争起到了关键作用, 但当各模式群速度难以分离时, 需要特别关

* 国家自然科学基金 (批准号: 12175176, 12235013) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaiyg@xjtu.edu.cn

注其他因素对模式竞争的影响. 2000 年, Vlasov 等^[8]提出一种通过矩形和半圆形组合的慢波波纹结构提高耦合阻抗进行模式选择的方法. 2014 年, 国防科技大学的张点等^[9]对三维 PIC 模拟的输出模式成分进行了分析, 二维模拟成功抑制了轴对称模式的竞争后, 在三维模拟中仍然存在严重的非轴对称模式竞争问题. 该研究在最后提出了调节慢波结构两端对非对称模式的反射以降低品质因数 Q , 抑制非对称模式的设想, 但慢波结构末端的反射难以准确计算, 间接测量结果的不确定性也超过了 10%^[10]. 西北核技术研究院的滕雁等^[6]在研究 TM_{02} 模式为主模的 RBWO 模式选择时, 提出要避免整管在竞争模式对应的频率下出现谐振. 改变高频结构的谐振特性来选择模式的方法也已经在纵向模式中得到了应用^[11]. 2022 年, 西安交通大学的强兰鹏等^[12]在各个竞争模式与工作模式品质因数接近的情况下, 通过理论计算和模拟得出, 减小电子束半径, 提高工作模式的耦合阻抗可以实现单一主模工作. 但电子束半径减小后波纹波导内壁与电子束的径向距离增加, 不利于束波能量交换, 且该研究未明确 Q 因子和耦合阻抗在模式竞争中的具体关系.

为进一步明确品质因数和耦合阻抗在 RBWO 模式竞争中的作用, 本文对 RBWO 中的模式竞争机制进行了分析与 PIC 模拟验证. 首先以简化高频结构的 S_{11} 参数曲线定性分析各模式的品质因数, 从而避免了对末端反射的计算, 然后采用全电磁粒子模拟软件 UNIPIC^[13-15]进行三维 PIC 模拟验证了品质因数与耦合阻抗共同控制工作模式的机制, 并给出了电子束半径的变化范围和模式不敏感参数. 最后使用 FSAWS-GA 算法^[16-18]对 RBWO 进行了参数优化, 得到工作模式稳定在 TM_{02} 模式, 输出功率大幅提高的器件.

2 束波相互作用理论

慢波结构 (slow wave structure, SWS) 是相对论返波管的核心部件, 波纹 r_w 可用下式表示:

$$r_w = r_0 + r_1 \cos\left(\frac{2\pi z}{p}\right), \quad (1)$$

其中 r_0 为波纹平均半径, r_1 为波纹深度, p 为慢波周期. SWS 决定了 RBWO 的色散曲线, 冷腔分析中返波管的工作点可近似为电子束的 Doppler 线与色散曲线的交点, 色散曲线在交点处的斜率即为

该模式的群速度 v_g ^[8]. 本文对色散曲线的计算基于不考虑电子束扰动的有限长慢波结构色散关系^[13,14]. 相对论返波管中电子束流大于起振电流时, 器件起振并产生功率输出, 起振电流^[19]:

$$I_{st} = \frac{2\pi f W}{Q\eta V_b}, \quad (2)$$

式中 W 为相互作用区储存的电磁场能量; f 为微波频率; V_b 为电子束电压; η 为采用无箔二极管时 RBWO 产生微波的理论效率,

$$\eta = 1 - \frac{\Delta V_1}{V_0}, \quad (3)$$

其中 ΔV_1 为环形电子束与管壁间的电势差, V_0 为阴极电势; Q 为品质因数^[20], 对于相对论返波管,

$$Q = \omega L / v_g (1 - |R|), \quad (4)$$

其中 v_g 为束波作用点的群速度, R 为末端反射系数, L 为束波相互作用区的长度. 此时起振电流表达式可写为

$$I_{st} = \frac{W v_g (1 - |R|)}{\eta L V_b}. \quad (5)$$

因此, 电磁波的群速度和反射系数共同影响品质因数, 进而影响器件工作的模式. 对于同一过模结构返波管运行中产生的各模式, Q 值较大, 即 v_g 较小、 R 较大模式的起振电流更低, 更容易起振. 耦合阻抗描述电磁波与电子束相互作用的有效程度, 相对论返波管中的环形电子束与 -1 次空间谐波耦合阻抗更大的电磁模式, 能够更好地与电子束进行相互作用, 因而更加容易被激励.

根据以上束波相互作用理论, 以 TM_{02} 模式为主模设计相对论返波管. 波纹结构参数 $r_0 = 10.0$ mm, $r_1 = 0.8$ mm, $p = 8.0$ mm, 后续设计均基于这一波纹结构. 电子束电压设置为 500 kV, 电流 4.5 kA, 磁场 2.8 T. 为实现电子束的良好调制, 使用双腔谐振腔反射器连接慢波波纹, 并在末端加入提取腔, 结构如图 1 所示.

图 2 为该参数下的色散曲线, 其中 k_n 为 n 次空间谐波的波矢, p 为慢波周期. 对于 TM_{0n} 模式, 该结构电子束线只与 TM_{01} , TM_{02} 模式色散曲线存在交点, 并且 TM_{02} 模式工作点的群速度远小于 TM_{01} , 模式竞争容易解决; 但在三维情况中, 还存在非轴对称模式, HE_{21} , EH_{41} , EH_{12} 模式与 TM_{02} 的色散曲线在束波互作用点几乎重合, 易发生模式竞争.

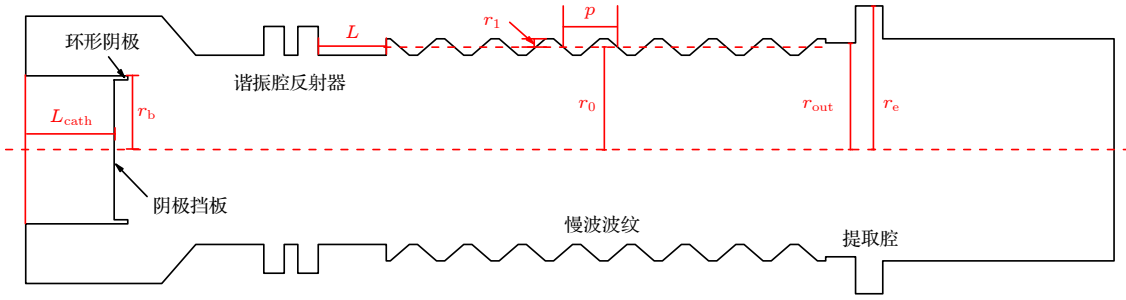


图 1 RBWO 结构参数示意

Fig. 1. Structure of RBWO.

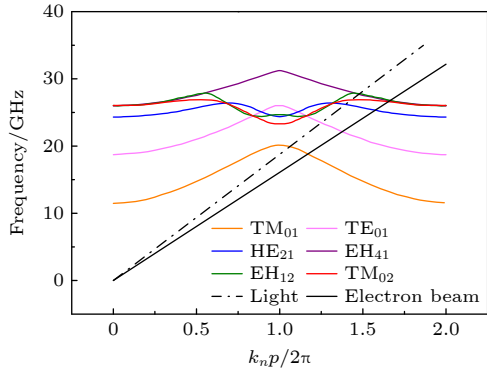


图 2 慢波结构色散曲线

Fig. 2. Dispersion diagrams of SWS.

返波管的耦合阻抗对模式选择起到了关键作用. 在调制方式相同的各模式中, 耦合阻抗最大的模式优先起振, 其他模式起振受到部分抑制, 并且其耦合阻抗之间的比值越大, 受到的抑制效果越明显 [12]. 电子束接近波纹时束波作用增强, 耦合阻抗较大, 根据参考文献 [12] 中的方法, 计算了色散曲线相近的各模式耦合阻抗 K_1 随电子束半径 r_b 的变化关系, 结果如图 3 所示. 为使 TM₀₂ 模式的耦合阻抗最大, 设置电子束半径 $r_b = 7.0$ mm.

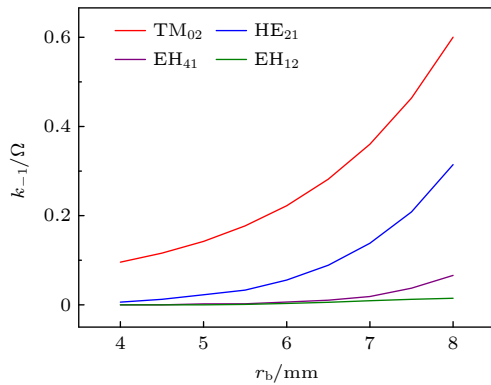


图 3 色散曲线相近的各模式耦合阻抗

Fig. 3. Coupling impedance of modes with similar dispersion curves.

3 模拟的近似与简化

由于阴极结构的存在, 在模拟中难以在端口馈入电磁波, 因此, 需要分析谐振腔反射器对微波的隔离作用以简化器件结构. 在 CST MICROWAVE STUDIO 中模拟, 计算不同双腔谐振腔反射器的反射系数 S_{11} (图 4), 得到两种对 TM₀₁, TM₀₂ 模式反射系数不同的谐振腔模型, 记为谐振腔反射器 1 和 2, 结构如图 5 所示, 具体参数见表 1. 随后对带有上述两种模型的 RBWO 进行 PIC 模拟, 分别改变阴极挡板在 z 方向的位置, 即图 1 中的 L_{cath} . 其他条件固定时, 若微波被谐振腔反射器完全隔离在束波互作用区, 则输出功率不会受 L_{cath} 的影响, 反之 L_{cath} 改变时输出功率会出现明显变化.

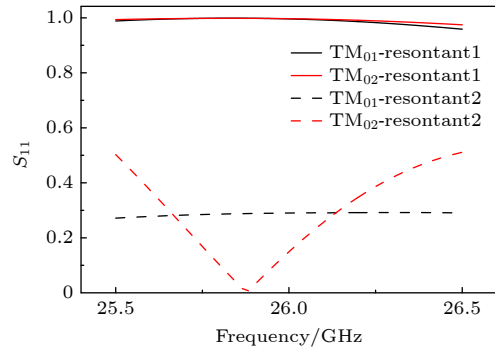


图 4 谐振腔反射器对两种模式的反射系数

Fig. 4. Reflection coefficient of cavity for both modes.

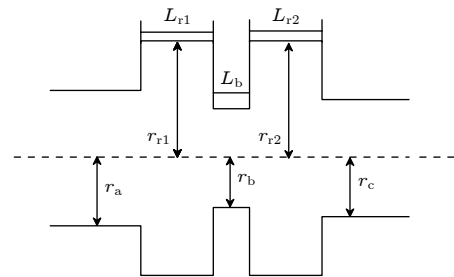


图 5 谐振腔反射器结构示意图

Fig. 5. Structure of the resonants.

表 1 谐振腔反射器参数
 Table 1. Parameters of the resonants.

序号	L_{r1}/mm	L_{r2}/mm	L_b/mm	r_{r1}/mm	r_{r2}/mm	r_a/mm	r_b/mm	r_c/mm
1	3.0	6.0	2.0	11.0	14.0	9.2	9.2	10.8
2	6.7	7.0	9.0	14.1	14.1	10.8	9.2	10.8

图 6 为不同结构下 RBWO 的输出功率随 L_{cath} 变化, 带有谐振腔反射器 2 和仅以光滑圆波导连接的两种返波管输出功率受阴极挡板位置的影响很大, 而带有谐振腔 1 的相对论返波管功率平稳. 说明反射良好的谐振腔反射器能够避免慢波结构中的电磁波进入阴极区域. 因此在使用反射系数较大的谐振腔反射器时, 可在冷腔分析中将相对论返波管的模型进行无阴极的简化.

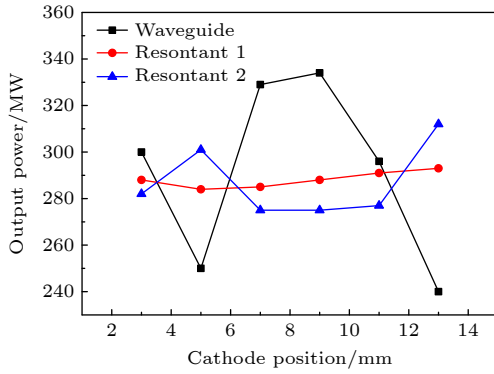


图 6 不同结构输出功率随阴极位置变化

Fig. 6. Variation of output power of different structures with position of cathode.

图 7 为模拟采用的简化 RBWO 模型, 使用谐振腔反射器 1 (参数见表 1), 提取腔一端为端口 1, 谐振腔一端为端口 2. 只考虑两端口的输入输出而不具体分析管内多次反射情况, 并忽略了阴极反射影响.

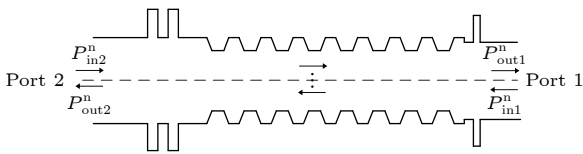


图 7 RBWO 高频结构模型

Fig. 7. High frequency structure model of RBWO.

SWS 中角向周期数 l 不为 0 时, 纵向电场与磁场必须同时存在才能满足边界条件. 因此非轴对称模式并不以 TE 或 TM 模式存在, 而是表现为混合模式 EH 与 HE^[21]. 而光滑波导不能存在混合模式. 为分析返波管整体的冷腔特性, 需要对混合模

式作出近似.

由于过模结构返波管半径较大, SWS 的 r_w 与 r_0 相差不足 10%, 可以作出 $r_w = r_0$ 的近似. 取慢波波纹内壁即 $r = r_w$ 处的电场切向分量为零, 将柱坐标系中亥姆霍兹方程的通解^[21]代入边界条件可得到与 TM 和 TE 模式形式相同的两个本构方程:

$$J_l(\Gamma_c r_0) = 0, \quad J'_l(\Gamma_c r_0) = 0. \quad (6)$$

其中 J_l 为 l 阶贝塞尔函数, J'_l 为 l 阶贝塞尔函数导函数, Γ_c 为角向截止频率. 因此慢波结构中的 EH 与 HE 模式的色散曲线可分别由相同平均半径的圆波导中 TE 与 TM 模式色散曲线进行近似, 此时波纹波导中的场分布也可以用圆柱波导近似. 慢波结构中的各种模式在与光滑圆柱波导的交界处存在反射, 根据在 $z = 0$ 处切向电磁场连续得到边界条件:

$$E_\theta|_{z=0+} = E_\theta|_{z=0},$$

$$H_\theta|_{z=0+} = H_\theta|_{z=0}. \quad (7)$$

设入射波振幅为 1, 反射波振幅 R , 透射波振幅 S , 对于 TM 模式:

$$\frac{k_R}{\Gamma_R^2} J_l(\Gamma_R r) (1 + R) = S \frac{k_S}{\Gamma_S^2} J_l(\Gamma_S r),$$

$$\frac{1}{\Gamma_R} J'_l(\Gamma_R r) (1 - R) = S \frac{1}{\Gamma_S} J'_l(\Gamma_S r). \quad (8)$$

其中 k_R, k_S 分别为反射波和透射波的纵向波数; Γ_R, Γ_S 分别为反射波和透射波的横向波数. 可消去 S 得到

$$R =$$

$$\frac{\frac{k_S}{\Gamma_S^2} J_l(\Gamma_S r) \frac{1}{\Gamma_R} J'_l(\Gamma_R r) - \frac{k_R}{\Gamma_R^2} J_l(\Gamma_R r) \frac{1}{\Gamma_S} J'_l(\Gamma_S r)}{\frac{k_S}{\Gamma_S^2} J_l(\Gamma_S r) \frac{1}{\Gamma_R} J'_l(\Gamma_R r) + \frac{k_R}{\Gamma_R^2} J_l(\Gamma_R r) \frac{1}{\Gamma_S} J'_l(\Gamma_S r)}. \quad (9)$$

由于入射波振幅为 1, 幅值 R 即为 TM 波的反射系数. 在 (6) 式的推导中我们已经得出, 慢波结构中的 HE 模式近似具有和圆波导 TM 模式相同形式的本构方程和场分布, 因此 HE 模式的反射系数 R 和谐振频率 f 可用 TM 模式近似, 同理 EH

模式的 R 和 f 也可用 TE 模式近似, 推导同上. 因此轴对称模式品质因数 Q 的表达式 (4) 对于非轴对称模式仍然适用. 但 (4) 式中的末端反射 R 与慢波结构的长度相关, 也受慢波结构与光滑波导的连接相位影响, 两端腔体的存在也会影响反射, 因此 R 值难以准确计算.

电磁波在返波管内部往返传播总相移为 2π 的整数倍时将产生谐振, 反射系数出现极小值, 因此 HE 和 EH 模式的谐振频率 f 也可用 TM 模式和 TE 模式近似. 将返波管的高频结构整体视为谐振腔时, 品质因数 Q 可定义为 [21]

$$Q = f/\Delta f, \quad (10)$$

其中 f 为谐振频率, Δf 为谐振峰半高宽. 根据 (10) 式可以通过 S_{11} 参数曲线中谐振峰的位置和宽度分析某一模式的品质因数, 从而避免了对 R 的计算.

4 模式选择的三维 PIC 模拟

在 UNIPIC 中建立如图 8 所示的返波管三维模型进行模拟, 使用谐振腔反射器 1, 提取腔半径 $r_e = 14.5$ mm, 宽度 2 mm. 器件输出功率 157 MW, 能量转换效率仅为 7.3%. 模拟得到的输出功率和电场幅值分布见图 9 和图 10, 场分布显示, 器件工作时出现了明显的模式竞争. 由于多个模式的色散曲线几乎重合, 难以通过改变群速度的方法选择模式. 此时需要考虑末端反射对于模式选择的影响, 根据高频结构 S_{11} 参数曲线中的谐振峰分析各群速度相近模式的品质因数.

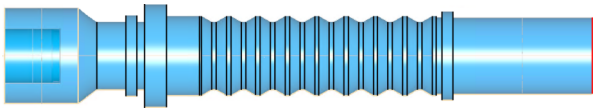


图 8 RBWO 三维结构

Fig. 8. Three-dimensional structure of the RBWO.

4.1 品质因数和耦合阻抗对模式影响

根据微波谐振定义, 通过改变谐振腔后漂移段长度 L 来改变谐振频率和品质因数. 电子束半径 r_b 设置为 7.0 mm, 此时 TM_{02} 模式与其他模式的耦合阻抗之间的比值较大, 起振优势明显. 在 UNIPIC 中进行三维模拟并对输出微波进行模式分析, 结果见表 2. 此时 TM_{02} 模式的占比随 L 变化非常明显, $L = 9$ mm 时出现了非轴对称模式

TE_{41} 与工作模式 TM_{02} 竞争的现象. 表 3 为 $L = 9$ mm 时各模式功率占比, TE_{41} 模式在输出模式中占据较大比例, 另外还存在 TM_{01} , TE_{01} , TM_{21} , TE_{21} 等多个模式, TM_{02} 模式输出功率占比仅为 46.75%.

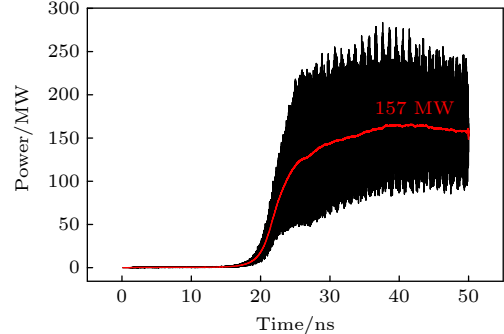


图 9 RBWO 的输出功率

Fig. 9. Output power of RBWO.

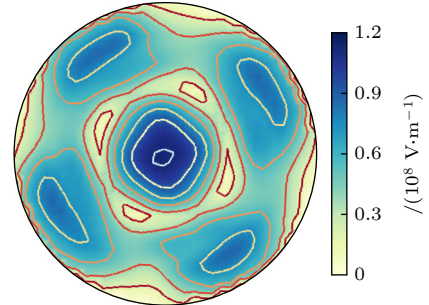


图 10 电场幅值在 $x-y$ 截面上的分布

Fig. 10. Distribution of electric fields in $x-y$ section.

表 2 PIC 模拟结果

Table 2. PIC simulation results.

序号	L/mm	r_b/mm	TM_{02} 功率占比/%	主要竞争模式及占比/%	
1	7.0	7.0	35.27	TM_{01}	24.36
2	7.5	7.0	42.09	TE_{41}	27.92
3	8.0	7.0	73.69	TE_{01}	13.91
4	8.5	7.0	33.24	TE_{41}	30.12
5	9.0	7.0	46.75	TE_{41}	32.53
6	10.0	7.0	53.70	TM_{01}	19.66
7	11.0	7.0	54.95	TM_{01}	22.72

表 3 $L = 9$ mm 时不同模式功率占比与品质因数

Table 3. Power ratio and Q of different modes when $L = 9$ mm.

	模式				
	TM_{02}	TE_{41}	TM_{01}	TE_{01}	其他
功率占比/%	46.75	32.53	19.09	1.52	0.01
谐振频率 f/GHz	26.00	25.98	26.09	25.95	—
Q	23.32	6493.75	783.48	462.57	—

对非轴对称的 TE_{41} 模式与工作模式 TM_{02} 的竞争机制进行分析, 将每种模式分别作为单一微波信号激励, 采用 CST MICROWAVE STUDIO 计算不同模式在高频结构中的 S_{11} 参数, 结果如图 11 所示. 由于均匀圆波导中不存在混合模式, 分别用圆波导 TM_{21} , TE_{41} , TE_{12} 模式近似了波纹结构中的 HE_{21} , EH_{41} , EH_{12} 模式. 根据 (10) 式计算不同模式的品质因数, TE_{41} 模式在接近 TM_{02} 模式的工作频率 26.02 GHz 附近出现了一个尖锐的谐振峰, 品质因数 Q 远大于谐振不明显的 TM_{02} 模式. 因此粒子模拟时 TE_{41} 模式在输出模式中占据较大比例 (如表 3 所列).

图 12(a) 显示电子相空间分布显示返波管内的电子群聚良好, 没有出现多组电子的群聚周期和相位不同的情况. 返波管的工作频率为 26.02 GHz, 与二维模拟时 TM_{02} 模式的工作频率基本一致. 可知器件的束波作用点并未改变. 结合之前对高频结构谐振的模拟可以得出, 此时输出的其他模式微波主要来自于同频模式的转换而不是在束波相互作用中产生.

电子束半径为 7.4 mm 时, 根据耦合阻抗选择模式的理论^[12], 纵向调制的 TM_{02} 模式与角向调制的 EH_{41} 模式都可能起振. 取 $L = 9$ mm, 此时高频结构中各模式的 S_{11} 参数仍如图 9 所示, 品质因数不变. 电子相空间分布和输出频谱如图 13, 返波管内存在多组群聚相位、周期不同的电子, 频谱中有 25.83 GHz 和 26.02 GHz 两个主要工作频率, 对应 TE_{41} , TM_{02} 模式. 说明此时发生了模式竞争, 且两个模式均在起振过程中产生.

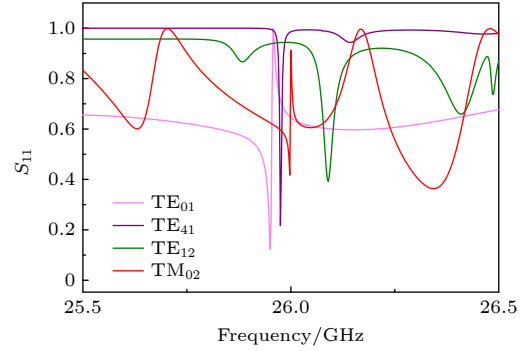


图 11 高频结构中不同模式的 S_{11} 参数

Fig. 11. S_{11} parameters for different modes in high frequency structure.

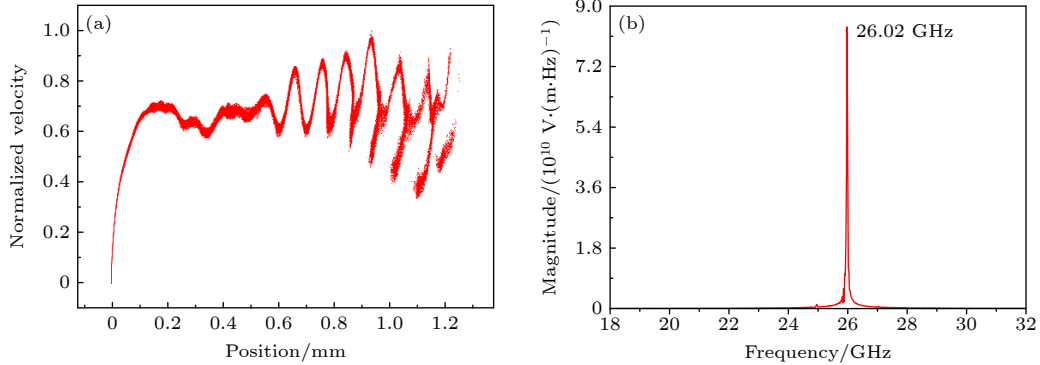


图 12 $r_b = 7.0$ mm, $L = 9$ mm 时的 PIC 模拟结果 (a) 电子相空间分布; (b) 输出频谱

Fig. 12. PIC simulation results when $r_b = 7.0$ mm, $L = 9$ mm: (a) Electronic phase spatial distribution; (b) output spectrum.

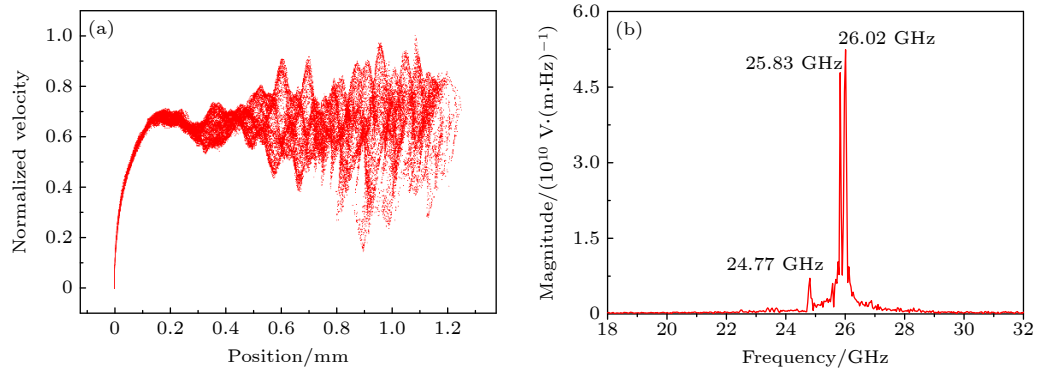


图 13 $r_b = 7.4$ mm, $L = 9$ mm 时的 PIC 模拟结果 (a) 电子相空间分布; (b) 输出频谱

Fig. 13. PIC simulation results when $r_b = 7.4$ mm, $L = 9$ mm: (a) Electronic phase spatial distribution; (b) output spectrum.

调整返波管的输出半径 r_{out} 和漂移长度 L , 计算不同参数下各模式的 S_{11} 参数曲线, 并分别选择对每种模式品质因数较大的模型进行 PIC 模拟, 结果见图 14—图 16 和表 4. 模拟结果显示, 电子束半径为 7.4 mm 时, 改变器件参数可以分别使器件在 TM_{21} , TE_{41} , TM_{02} 三种色散曲线相近的模式下工作, 工作频率分别为 24.57 GHz, 25.83 GHz, 26.02 GHz, 与色散曲线中计算的各模式工作频率相符. 可知当耦合阻抗优势不明显时, 改变 L 以调整高频结构的谐振, 可以改变束波相互作用过程从而影响到起振模式.

由于色散曲线没有改变, 谐振对模式的影响实质上是反射系数 R 主导下的品质因数对模式的影响. 根据上述模拟结果可得, 起振模式由耦合阻抗

和品质因数共同决定. 并且由于相对论返波管束波作用十分复杂, 具有较高的耦合阻抗和品质因数都是成为工作模式的必要条件, 如 EH_{12} 模式的耦合阻抗远小于 TM_{02} 模式, 即使在多种结构下都具有良好的谐振特性, 该模式仍然难以成为单一的工作模式.

表 4 不同模式的工作参数
Table 4. Operating parameters.

	模式		
	TM_{02}	TE_{41}	TM_{21}
工作频率/GHz	26.02	25.83	24.57
谐振频率 f /GHz	26.00	25.97	24.38
r_{out} /mm	10.8	10.6	10.7
L /mm	9.0	11.0	7.0
Q	3610.8	3935.6	2890.6

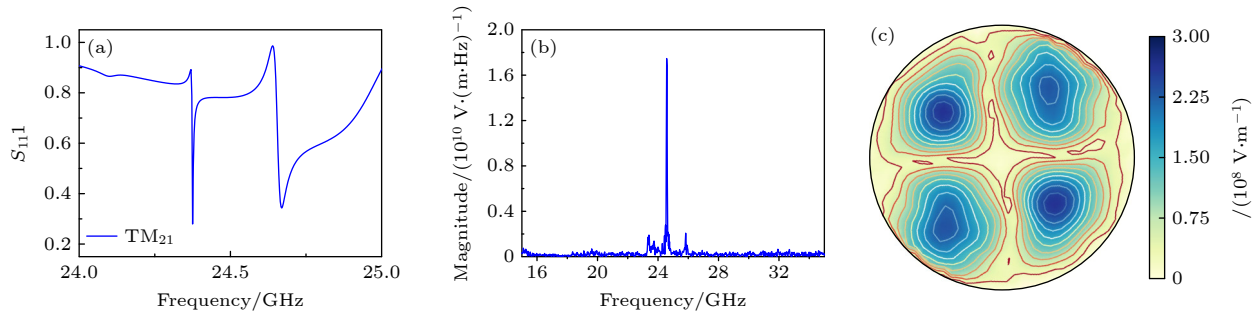


图 14 输出 TM_{21} 模式时模拟结果 (a) S_{11} 参数; (b) 频谱; (c) 电场幅值

Fig. 14. Simulation results when TM_{21} mode is output: (a) S_{11} parameter; (b) spectrum; (c) electric field amplitude.

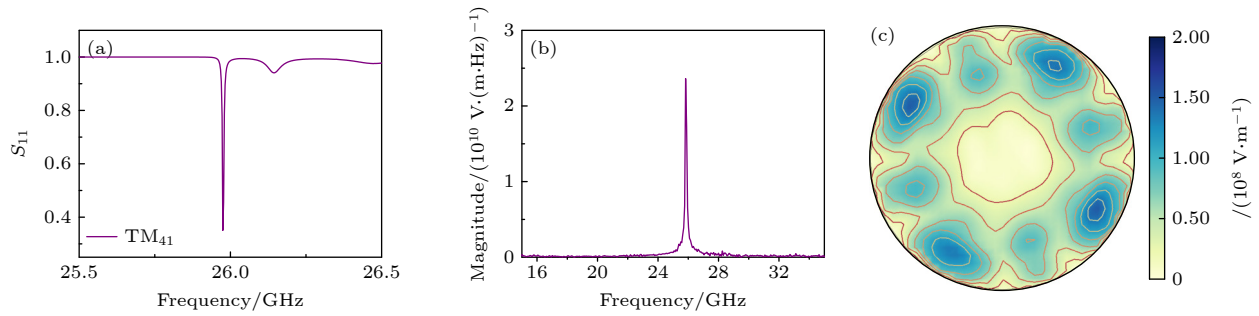


图 15 输出 TE_{41} 模式时模拟结果 (a) S_{11} 参数; (b) 频谱; (c) 电场幅值

Fig. 15. Simulation results when TE_{41} mode is output: (a) S_{11} parameter; (b) spectrum; (c) electric field amplitude.

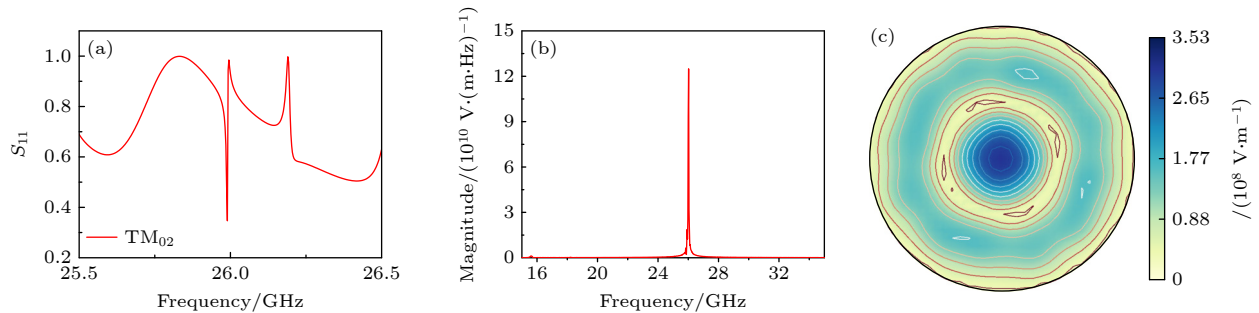


图 16 输出 TM_{02} 模式时模拟结果 (a) S_{11} 参数; (b) 频谱; (c) 电场幅值

Fig. 16. Simulation results when TM_{02} mode is output: (a) S_{11} parameter; (b) spectrum; (c) electric field amplitude.

在电子束半径 6.5—7.7 mm 的范围内, TM_{02} 模式都可以通过调整高频结构的谐振特性起振. 作为对比的是, 当没有用于调整品质因数的谐振腔时, 电子束半径大于 7.0 mm 的返波管内就会出现其他非轴对称模式. 电子束半径接近波纹结构时更有利于束波能量的交换, 因此谐振特性对返波管工作模式的控制为输出功率的优化提供了更大空间.

4.2 RBWO 的参数优化

模糊简单加性加权遗传算法^[16] (fuzzy simple additive weighting genetic algorithm, FSAWS-GA) 是一种结合多准则决策分析方法和遗传算法的多目标优化方法, 使用 FSAWS-GA 算法可以对上述 RBWO 进行多目标优化设计. 优化时希望在保证工作模式纯度的前提下提高输出功率, 但该算法不能对工作模式进行直接分析, 只能通过工作频率初步判断, 并且优化模拟在 2.5 维下进行, 无法分析非轴对称模式的影响. 在优化前需要在三维模拟中找到对工作模式影响较小的参数作为 FSAWS-GA 算法的待优化参数.

相对论返波管中谐振腔后漂移段承担着电子束相位调制的作用, 并影响了电子束射频电流^[10], 是提高 RBWO 输出功率的重要参数. 但 L 也在很大程度上影响着微波在高频结构中的谐振, 在优化过程中改变 L 会不可避免地对工作模式造成影响, 模拟中发现, 返波管输出半径 r_{out} 对工作模式影响极大. 谐振腔反射器参数不变, $r_{out} = 10.8$ mm 时, 在不同的 L 下模拟, 结果见图 17, TM_{02} 模式功率的占比均在 86.1%—92.5% 之间. 而 $r_{out} = 10.4$ mm 时改变 L , TM_{02} 模式功率占比为 35.3%—81.6%.

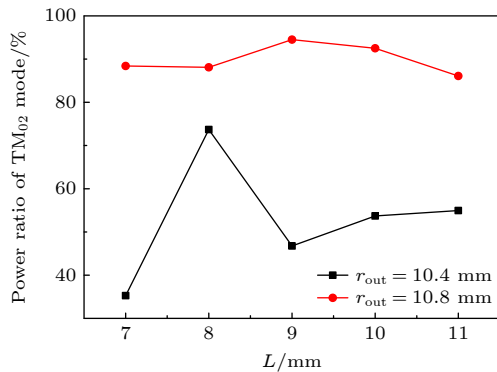


图 17 不同输出半径下模式纯度随漂移段长度的变化
Fig. 17. Variation of the mode purity with L under different r_{out} .

提取腔对返波管的品质因数和输出特性存在重要影响. $r_e = 16, 17, 18$ mm 时模拟得到的 TM_{02} 模式品质因数分别为 199.8, 371.2, 683.7, 而此时主要产生竞争的 TE_{41} 和 TM_{21} 模式几乎不出现谐振. 图 18 的 PIC 模拟结果显示提取腔半径 r_e 对输出功率影响显著, 且 r_e 范围在 15—17 mm 时, TM_{02} 模式的功率占比都较高, 因此 r_e 也可以作为重点待优化参数.

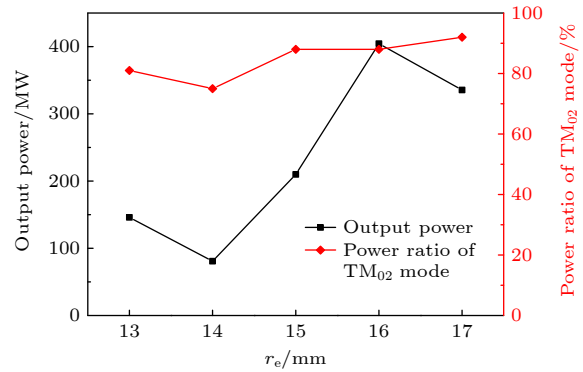


图 18 提取腔半径对输出功率和模式纯度的影响
Fig. 18. Effect of r_e on output power and model purity.

根据以上结论, 取 $r_{out} = 10.8$ mm, 其余需要优化的几何参数取值范围如表 5, 其中 L_b 为磁场加载的长度, B 为磁场强度. 优化目标为输出功率 (P_{out})、工作频率 (f_w) 和频率纯度 (A_{secf}/A_{maxf}). 输出功率为趋势型性能参数, 工作频率和频率纯度用于判断工作模式. 各参数的优化结果如表 6 所列.

表 5 参数变化范围及精度
Table 5. Parameter variation range and precision.

参数	初始值	变化范围	精度
L /mm	7.0	[5.0, 11.0]	0.1
r_e /mm	16.5	[14.0, 20.0]	0.1
r_b /mm	7.0	[6.4, 7.6]	0.1
L_B /mm	125.0	[100.0, 160.0]	0.1
B /T	2.8	[0.4, 3.0]	0.01

表 6 各参数优化结果
Table 6. Optimization results of each parameter.

参数	L /mm	r_e /mm	r_b /mm	L_B /mm	B /T
优化结果	6.5	15.5	7.2	118.1	1.42

将优化后的 RBWO 在 UNIPIC 中进行三维 PIC 模拟, 模拟结果见图 19—图 21, 返波管输出功率达到 534 MW, 能量转换效率 23.64%, 磁场强度降低至 1.42 T. 器件工作模式仍然稳定, 输出频

率 26.02 GHz, 在 24.00—28.00 GHz 频率范围内, 输出 TM_{02} 模式的功率占总功率的 94.95%.

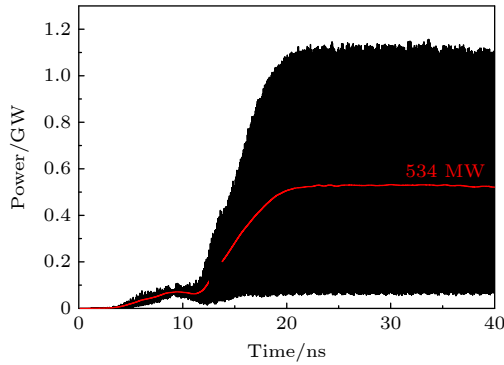


图 19 输出功率
Fig. 19. Output power.

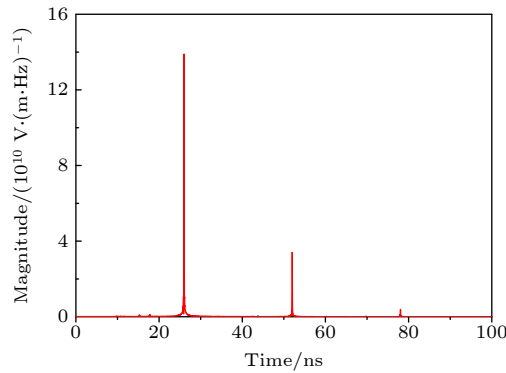


图 20 输出频谱
Fig. 20. Output spectrum.

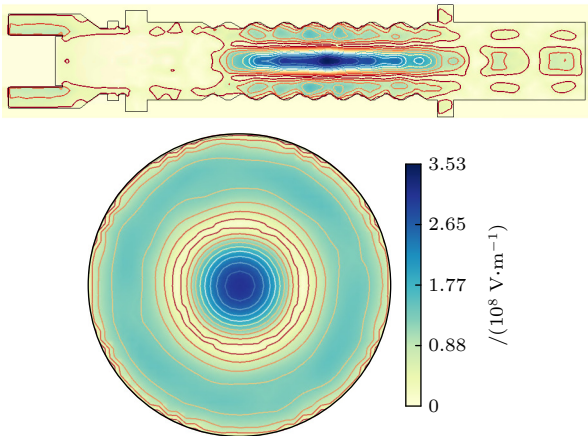


图 21 电场幅值分布
Fig. 21. Electric field amplitude.

5 结 论

本文对过模相对论返波管中的模式竞争进行了理论分析和三维 PIC 模拟, 依据品质因数和耦合阻抗实现了 TM_{02} 模 RBWO 的模式选择, 并在

模拟中对其进行了输出功率和磁场强度的优化.

品质因数与各模式的群速度和末端反射有关, 有些非轴对称模式的色散曲线非常接近, 群速度基本相等, 需要考虑末端反射以区分不同模式的品质因数. 频域模拟中以 S_{11} 参数曲线分析各模式的品质因数, 可避免对末端反射的计算.

三维模拟结果显示, 耦合阻抗和品质因数共同影响着工作模式. 工作模式的耦合阻抗优势不明显时, 改变高频结构谐振可以影响束波相互作用过程, 从而改变起振模式; 优势明显时, 起振模式的束波相互作用不会被谐振模式破坏, 输出的其他模式微波主要来自同频模式的转换. 由于色散曲线不变, 谐振对模式的影响的实质是末端反射主导下的品质因数对模式的影响.

以三维模拟得出的对模式不敏感参数和电子束半径作为待优化参数, 使用 FSAWS-GA 算法结合二维模拟对上述 RBWO 中进行多目标优化设计. 最终得到的返波管输出功率达到 534 MW, 效率 23.64%, 较原始器件增加了 221.7%. 器件工作模式仍然稳定, TM_{02} 模式的功率占比达到 94.95%.

感谢西安计算中心在模拟中提供的计算资源支持.

参考文献

- [1] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E (translated by Jiang W H, Zhang C) 2009 *High Power Microwave* (Beijing: National Defence Industry Press) pp1, 2 (in Chinese) [本福德, 斯威格, 谢米洛格鲁 著 (江伟华, 张驰 译) 2009 高功率微波 (北京: 国防工业出版社) 第 1, 2 页]
- [2] Gold S H, Nusinovich G S 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 3945
- [3] Gunin A V, Klimov A I, Korovin S D, Kurkan I K, Pegel I V, Polevin S D, Roitman A M, Rostov V V, Stepchenko A S, Totmeninov E M 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 326
- [4] Ye H, Chen C H, Hui N, Teng Y 2015 *IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)* Beijing, China April 27–29, 2015 p15412768
- [5] Xiao R Z, Shi Y C, Wang H D, Zhang G, Sun J 2020 *Phys. Plasmas* **27** 043102
- [6] Teng Y, Cao Y B, Song Z M, Ye H, Shi Y C, Chen C H, Sun J 2014 *Phys. Plasmas* **21** 123108
- [7] Teng Y, Wang D Y, Li S, Yang D W, Shi Y C, Wu P, Wu X 2019 *Phys. Plasmas* **26** 053105
- [8] Vlasov A N, Shkvarunets A G, Rodgers J C, Carmel Y, Antonsen T M, Abulfadl T M, Lingze D, Cherepenin V A, Nusinovich G S, Botton M 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 550
- [9] Zhang D, Zhang J, Zhong H H, Jin Z, Yuan Y 2014 *Phys. Plasmas* **21** 491
- [10] Liu G Z, Chen C H 2021 *Introduction to Relativistic Backwave Oscillator* (Beijing: Science Press) p90 (in Chinese) [刘国治, 陈昌华 2021 相对论返波管导论 (北京: 科学出版社)]

第 90 页]

- [11] Zhang J, Zhong H H, 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 206 (in Chinese) [张军, 钟辉煌 2005 物理学报 **54** 206]
- [12] Qiang L P, Teng Y, Zhang J W, Luo W, Li Y D, Wang Y, Wang H G 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 7025
- [13] Li Y D, Wang H G, Liu C L, Zhang D H, Wang J G, Wang Y 2009 *High Power Laser Part. Beams* **21** 1866 (in Chinese) [李永东, 王洪广, 刘纯亮, 张殿辉, 王建国, 王玥 2009 强激光与粒子束 **21** 1866]
- [14] Wang J G, Chen Z G, Wang Y, Zhang D H, Liu C L, Li Y D, Wang H G, Qiao H L, Fu M Y, Yuan Y A 2010 *Phys. Plasmas* **17** 073107
- [15] Fang A P, Liang S S, Li Y D, Wang H G, Wang Y 2020 *Chin. Phys. B* **29** 100205
- [16] Yang W J, Li Y D, Wang H G, Jiang M, Cao M, Liu C L 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 3892
- [17] Le Chap T 1998 *An Introduction to Genetic Algorithms* (Cambridge: MIT Press)
- [18] Chou S Y, Chang Y H, Shen C Y 2008 *Eur. J. Operational Res.* **189** 132
- [19] Bugaev S P, Cherepenin V A 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 518
- [20] Swegle J A, Poukey J W, Leifste G T 1985 *Phys. Fluids* **28** 2882
- [21] Jin J M 2017 *Theory and Computation of Electromagnetic Fields* (2nd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp183–186 (in Chinese) [金建铭 著 (尹家贺 译) 2017 高等电磁场理论 (北京: 电子工业出版社) 第 183—186 页]

Influence of quality factor on operating mode of TM₀₂ mode relativistic backwave oscillator*

Li Yu-Qing¹⁾ Wang Hong-Guang¹⁾ Zhai Yong-Gui^{1)†} Yang Wen-Jin¹⁾
Wang Yue¹⁾ Li Yun²⁾ Li Yong-Dong¹⁾

1) (*Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China*)

(Received 27 September 2023; revised manuscript received 20 October 2023)

Abstract

The mode competition in an overmoded relativistic backward wave oscillator is studied through theoretical analysis and three-dimensional particle-in-cell simulation in this work. Based on the quality factor and coupling impedance, the mode selection for a TM₀₂ mode backward wave oscillator is achieved, and its output power and magnetic field strength are optimized in the simulation.

The quality factor is related to the group velocity and end reflection of each mode. The dispersion curves of some non-axisymmetric modes are very close, and the group velocities are basically equal. Therefore, the end reflection needs considering to distinguish between the quality factors of different modes. In frequency domain simulation, analyzing the quality factor of each mode by using the S_{11} parameter curve can avoid calculating the end reflection.

The three-dimensional simulation results show that the coupling impedance and quality factor jointly affect the operating mode. When the coupling impedance advantage of the working mode is not obvious, changing the resonant frequency of the high-frequency structure can affect the beam-wave interaction process, thereby changing the excitation mode. When the advantage is obvious, the beam-wave interaction of the excitation mode will not be destroyed by the resonant mode, and other modes of microwave output mainly come from the conversion of the same frequency modes. Due to the constant dispersion curve, the effect of resonance on the mode is essentially the effect of the quality factor on the mode dominated by the end reflection.

The insensitive parameters and the electron beam radius obtained from the simulation are used as the optimal parameters, and the automatic optimization algorithm is used in combination with the two-dimensional simulation to perform multi-objective optimization design in the above device. The final output power of the backward wave oscillator reaches 534 MW, with an efficiency of 23.64%, an increase of 221.7% compared with the efficiency of the original device. The device operating mode remains stable, with a power ratio of TM₀₂ mode reaching 94.95%.

Keywords: relativistic backward wave oscillator, mode selection, non-axisymmetric mode, particle-in-cell simulation

PACS: 52.65.Rr, 84.40.Fe, 84.30.Ng

DOI: 10.7498/aps.73.20231577

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12175176, 12235013).

† Corresponding author. E-mail: zhaiyg@xjtu.edu.cn

品质因数对 TM_{02} 模相对论返波管工作模式影响

李雨晴 王洪广 翟永贵 杨文晋 王玥 李韵 李永东

Influence of quality factor on operating mode of TM_{02} mode relativistic backwave oscillator

Li Yu-Qing Wang Hong-Guang Zhai Yong-Gui Yang Wen-Jin Wang Yue Li Yun Li Yong-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 035202 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231577

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231577>

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

收集极释气对相对论返波管影响的粒子模拟

Particle-in-cell simulation on effect of collector outgassing on relativistic backward oscillator

物理学报. 2019, 68(18): 185203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190554>

X波段高效率速调型相对论返波管研究

Investigation of an X band high efficiency klystron-like relativistic backward wave oscillator

物理学报. 2020, 69(16): 164102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200434>

S波段低磁场高效率相对论返波管振荡器研究

S-band high-efficiency relativistic backward wave oscillator with low magnetic field

物理学报. 2019, 68(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182155>

磁绝缘线振荡器中模式竞争的物理分析和数值模拟

Competitions among modes in magnetically insulated transmission line oscillator

物理学报. 2020, 69(19): 198401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200383>

全腔输出相对论磁控管输出模式转换结构的理论设计和数值模拟

Design and simulation of output mode conversion structure of relativistic magnetron with all cavity output

物理学报. 2018, 67(18): 188401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180358>

外加电场作用下的壁面约束衰亡等离子体中带电粒子非平衡输运特性

Non-equilibrium transport of charged particles in a wall-confined decaying plasma under an externally applied electric field

物理学报. 2022, 71(23): 232801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221431>