

# 基于 T 形四周期谐振慢波结构的 X 波段 高功率微波产生技术的理论与仿真\*

骆新耀 薛宇哲 徐彻† 杜创洲 刘庆想

(西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031)

(2023 年 12 月 6 日收到; 2024 年 2 月 4 日收到修改稿)

优化设计了 T 形四周期谐振慢波结构, 并进行了高频理论分析. 利用镜像法将 T 形波导单元进行脊波导化等效设计, 并通过等效电路分析了等效脊波导的高频特性, 由此进行 T 形波导的谐振频率与结构解析理论分析. 在此基础上构造了 T 形四周期谐振慢波结构, 对该结构进行色散特性分析, 确定谐振模式和频率, 得到了模式同步电压范围. 最后基于提出的 T 形周期谐振慢波结构进行对应的相对论扩展相互作用辐射源的仿真验证. 通过三维粒子仿真模拟分析及优化设计, 在 448 kV 注电压、400 A 注电流和 0.4 T 的均匀轴向磁场条件下, 得到了频率为 9.8 GHz、平均输出功率 71.4 MW 的高功率微波, 对应电子效率为 39.8%. 本文提出的以 T 形波导为单元的新型谐振慢波结构有效地利用较少周期实现高效率、高功率微波产生, 为高功率微波科学提供了有效的高频结构的紧凑化方案.

**关键词:** 高功率微波, 扩展相互作用, 慢波结构, 渡越辐射振荡器

**PACS:** 41.20.-q, 84.40.Fe, 84.47.+w

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231921

## 1 引言

高功率微波 (high power microwave, HPM) 真空电子器件是一种使电子在真空中与电磁场相互作用, 从而将能量转化为电磁波的器件, 被誉为 HPM 系统的“心脏”<sup>[1,2]</sup>. 随着高功率电子对抗发展的迫切需求, HPM 真空电子器件不断朝着小型化、高效率、高增益发展<sup>[3-7]</sup>. 为了进一步实现器件的紧凑化和高效化, 渡越辐射器件作为典型的高效线形束 HPM 器件, 得到了各个机构的广泛研究, 如北京真空电子技术研究所研制的 X 波段 3 MW 小型化高峰值功率多注速调管<sup>[8]</sup>, 整管长约 330 mm; 中国工程物理研究院应用电子学研究所研制的 Ka 波段的同轴多注相对论速调管振荡器<sup>[9]</sup>得到

了 610 MW 的输出微波, 电子效率为 40.7%; 西北核技术研究所与清华大学共同研制的 S 波段感性加载宽间隙腔相对论速调管<sup>[10]</sup>, 整管长约 250 mm, 输出功率约 1.2 GW, 电子效率为 40%. 上述渡越辐射器件产生了可观的 HPM 辐射, 但典型的 RKA 仍基于单间隙谐振腔结构, 单谐振腔的特性阻抗受限.

相关文献表明, 通过利用周期性谐振慢波结构 (resonant slow-wave structure, RSWS) 可有效提高谐振腔特性阻抗<sup>[11-14]</sup>, 有利于在有限的电路长度内获得尽可能高的电路增益<sup>[15-17]</sup>, 从而实现器件的紧凑化设计. 许多机构关于紧凑化的研究有效地缩短了器件中束波相互作用段的长度, 比如中国工程物理研究院提出的 X 波段的高重频长脉冲高功率多注相对论速调管放大器<sup>[18]</sup>, 整管长约 400 mm, 输出功率大于 1 GW, 电子效率大于 30%; 国防科技

\* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2682023CX076)、高功率微波技术创新工作站开放课题 (批准号: W031229901) 和四川省自然科学基金 (批准号: 24NSFSC7256) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuche@swjtu.edu.cn

大学研制的 X 波段相对论速调管振荡器<sup>[19]</sup>, 采用四间隙调制腔和三间隙提取腔的同轴结构, 整管长约 200 mm, 在仿真中得到输出功率约为 3.65 GW 的微波, 电子效率为 40%. 上述器件基于同轴结构实现器件的小型化. 为进一步实现 HPM 器件的小型化、高效率及减小模式竞争的目标, 本文基于非同轴的周期互耦结构, 开展了新型紧凑的 T 形四周期谐振慢波结构 HPM 产生器件研究, 分析了 T 形 RSWS 的高频特性和色散特性. 最后以 T 形四周期 RSWS 为基础, 进行对应扩展相互作用振荡器 (relativistic extended interaction oscillator, REIO) 辐射源的仿真验证, 对其束波相互作用进行分析. 本文所提出的慢波谐振电路及理论分析可为 HPM 源器件的高效率紧凑化电路提供有效可选方案和技术积累.

## 2 高频特性分析

为有效构建 T 形周期谐振慢波结构, 本部分采用镜像法分析基于 T 形周期的谐振慢波结构高频特性. 假设将 T 形波导沿  $y$  方向镜面对称构造为脊波导, 该脊波导的基本结构单元及等效电路如图 1 所示. 由于对称面边界条件为电边界 ( $E_t = 0$ ), 根据镜像法原则, T 形波导的特征模频率可与脊波导的高阶模式频率相对应; 相同频率下, T 形波导的电场分布与脊波导一致. 在  $TE_{0n}$  波传输状态下, 其相关参数表示如下<sup>[20-22]</sup>:

$$C_s = \varepsilon y_g / z_g, \quad (1)$$

$$C_d = \frac{\varepsilon}{2\pi} \left[ \frac{x^2 + 1}{x} \operatorname{ch}^{-1} \left( \frac{1+x^2}{1-x^2} - 2 \ln \frac{4x}{1-x^2} \right) \right],$$

$$x = z_g / z_c, \quad (2)$$

式中,  $C_s$  和  $C_d$  分别为竖直腔体 (间隙腔) 和横向腔

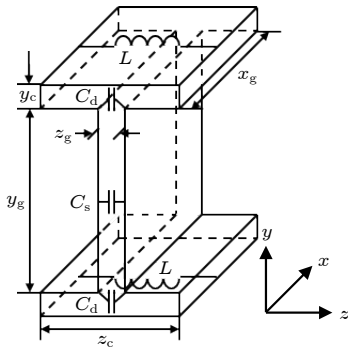


图 1 脊波导模型图

Fig. 1. Model diagram of ridged waveguide.

体 (耦合腔) 与竖直腔体连接处单位长度的等效电容;  $\varepsilon$  为真空介电常数;  $x_g$ ,  $y_g$  和  $z_g$  分别为间隙腔在  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的长度;  $y_c$  和  $z_c$  分别为耦合腔在  $y$  和  $z$  方向的长度.

$$L = \mu z_c y_c. \quad (3)$$

由电容  $C_0$  和电容  $C_s$  并联、两电感  $L$  并联, 可以得到:

$$C_0 = C_s + 2C_d, \quad (4)$$

$$L_0 = L/2. \quad (5)$$

因此其截止频率为

$$\omega_c = \sqrt{1/(L_0 C_0)}. \quad (6)$$

对于脊波导的  $TE_{10}$  模, 它的谐振频率为<sup>[23]</sup>

$$\omega_{TE_{10}} = \sqrt{\omega_c^2 + \omega_x^2}, \quad (7)$$

式中,  $\omega_x = c\pi/x_g$ .

进一步地, 在  $x_g = 21.3$  mm,  $y_g = 2 \times 55.6$  mm = 111.2 mm,  $z_g = 4.5$  mm 的条件下通过电磁仿真软件对脊波导和对应尺寸的 T 形波导进行本征模仿真, 得到两种基本模型的谐振频率以及电场分布, 分别如表 1 和图 2 所示. 从图 2(a), (b) 可以看出, 两种结构的基模电场分布相同. 此外, 由表 1 可知, 图 2(a), (b) 结构对应的基模本征频率保持一致,

表 1 T 形波导和脊波导基本模型对应的谐振频率  
Table 1. Frequency of T-shaped waveguide and ridged waveguide.

$f_{T\text{-shaped}}/\text{GHz}$	$f_{\text{ridged}}/\text{GHz}$
—	7.0945
7.2794(图2(a))	7.2813(图2(b))
—	7.6319
8.1455(图2(c))	8.1461(图2(d))

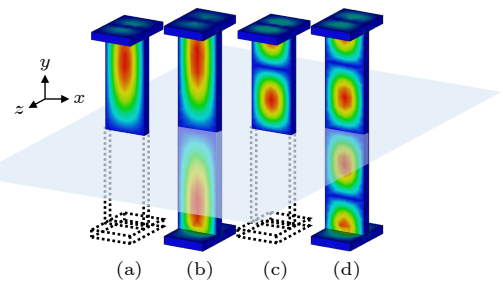


图 2 T 形波导和脊波导的电场分布 (a) T 型波导基模; (b) 脊波导二阶模; (c) T 形波导二阶模; (d) 脊波导四阶模

Fig. 2. Electric field distributions of T-shaped waveguide and ridged waveguide: (a) Fundamental mode of T-shaped waveguide; (b) second order mode of ridged waveguide; (c) second order mode of T-shaped waveguide; (d) fourth order mode of T-shaped waveguide.

分别为 7.2794 GHz 和 7.2813 GHz, 相对误差小于 0.03%. 相似地, 两种结构的高阶模电场分布也近乎相同, 如图 2(c), (d) 所示; 对比表 1 可知, 图 2(c), (d) 对应的谐振频率保持一致, 分别为 8.1455 GHz 和 8.1461 GHz, 相对误差小于 0.01%.

为进一步说明 T 形波导单元的镜像法模式及谐振频率确定机制, 图 3 对比展示了 T 形波导单元和脊波导单元的更多 (二阶以上) 高阶模式谐振频率. 由图 3 可知, 脊波导从第二高阶模式开始, 每个偶次高阶模的频点均与 T 形波导的频点几乎重合; 而每个奇次高阶模由于不满足镜像法的对称面电边界原则, 所以不存在对应的 T 形波导模式. 因此, 由镜像法对 T 形波导的结构频率解析方法被认为是有效的.

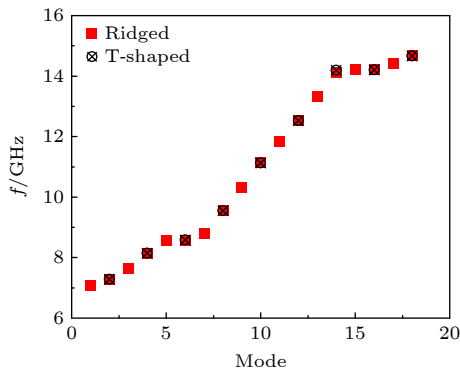


图 3 两种模型的高次模频率对比

Fig. 3. Comparison of frequency between T-shaped waveguide and ridged waveguide.

对于脊波导的高次模  $TE_{m(x)n(y)}$ , 其谐振频率可表示为

$$\omega = \sqrt{\omega_c^2 + (m\omega_x)^2 + (n\omega_y)^2}, \quad (8)$$

式中  $\omega_x = \frac{c\pi}{x_g}$ ,  $\omega_y = \frac{c\pi}{y_g}$ ,  $m$  为  $x$  轴方向波包的个数,  $n$  为  $y$  轴方向波包的个数. 为了得到 T 形波导的主模  $TE_{10}$  的频率, 可以计算脊波导  $TE_{11}$  模式的谐振频率, 即:

$$\omega_{TE_{11}} = \sqrt{\omega_c^2 + \omega_x^2 + \omega_y^2}. \quad (9)$$

通过计算不同  $x_g$ ,  $y_g$ ,  $z_g$  下脊波导  $TE_{11}$  模式的谐振频率, 并与仿真结果进行比较, 可得到如图 4 中散点图的结果. 由图 4 可知, 随着  $x_g$ ,  $y_g$ ,  $z_g$  的改变, 脊波导单元和 T 形波导单元的仿真频率始终一致. 进一步地, 随着  $y_g$  的增大, 理论计算得到的频率逐渐与仿真得到的频率接近; 随着  $x_g$  的减小, 理

论计算得到的频率逐渐与仿真得到的频率接近; 理论计算得到的频率与仿真得到的频率两者之间随着  $z_g$  没有明显变化. 通过计算理论频率和仿真理论的误差, 可得到如图 4 中点线图的结果. 可以看出, 两者的相对误差始终低于 0.8%, 且随着  $y_g$  的增大, 相对误差单调减小; 随着  $x_g$  的增大, 相对误差逐渐增高.

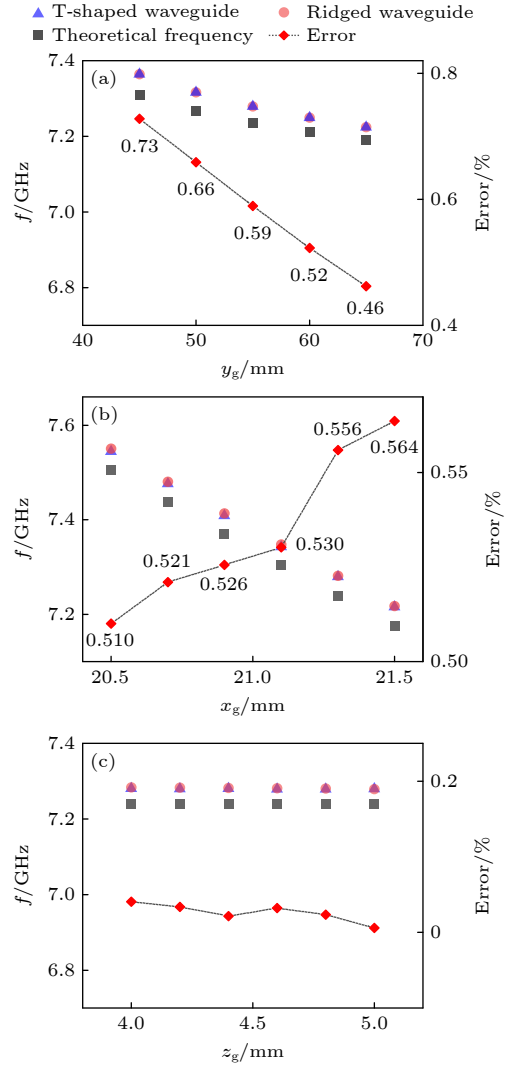


图 4 理论频率和仿真理论以及误差 (a) 谐振频率随  $y_g$  的变化; (b) 谐振频率随  $x_g$  的变化; (c) 谐振频率随  $z_g$  的变化

Fig. 4. Theoretical frequency and simulated frequency and error: (a) The variation of frequency and error with  $y_g$ ; (b) the variation of frequency and error with  $x_g$ ; (c) the variation of frequency and error with  $z_g$ .

### 3 色散特性分析

色散曲线分析法可以得到四周期 RSWS 的工作电压、工作频率和模式竞争等相关信息 [23]. 由于

理论推导难以计算本文设计的振荡器的色散曲线,因此采用本征模求解器仿真模型,计算器件的色散曲线.利用电磁仿真软件中的周期边界条件得到以 T 形波导为单元的周期模型的色散特性.

为了让 T 形周期排布慢波结构的器件能工作于 X 波段,并且能在注通道与耦合腔间容纳磁聚焦结构,需预留一定高度,即  $y_g$  需要大于一定值.此外,注通道附近的调制腔嵌入了调节电场分布的耦合块,这使得  $x_g$  更宽.在以上条件下, $y_g$  需大于 40 mm、 $x_g$  可在 22 mm 附近.同步条件和频率-相位关系分别为

$$\beta = \frac{m\pi}{L}, \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} = \frac{2\pi f}{v_p}, \quad v_p \leq v_e, \quad (11)$$

其中,  $m$  对应各个工作模式,  $L$  为单元的周期,  $v_p$  为相速度,  $v_e$  为电子速度.由此可以得到,在 400 kV 束电压、400 A 束电流的条件下,周期  $L$  应略小于 38.8 mm.

在以上条件下,令 T 形波导单元周期排列形成谐振慢波结构,从而构建的四周期 RSWS 模型如图 5 所示.通过本征模求解器可得到该模型的电场分布,如图 6 所示,电场沿  $z$  轴以  $\pi$  模或者  $3\pi$  模分布,并且腔中的场强幅值呈先递增后骤降的趋势,其中第三腔的电场强度最大.

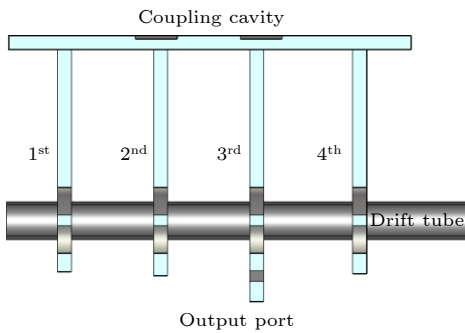


图 5 T 形四周期 RSWS 模型图

Fig. 5. Model of transit radiation oscillator with T-shaped slow-wave structure.

由 (10) 式和 (11) 式可以得到不同速度对应的频率:

$$f = \frac{v_p}{2L} m. \quad (12)$$

由此可以得到图 7 所示的各个腔内的电压线.图 7 给出了本文所设计的四周期 REIO 对应的色散曲线和 450 kV 直流电压下的工作电压线.图中的灰

线为周期边界条件下得到的色散曲线;图中的绿点为图 5 所示模型仿真得到的离散的色散点,由于模型并未严格服从均匀周期分布,因此得到的色散点与周期边界的色散曲线存在一定偏差.

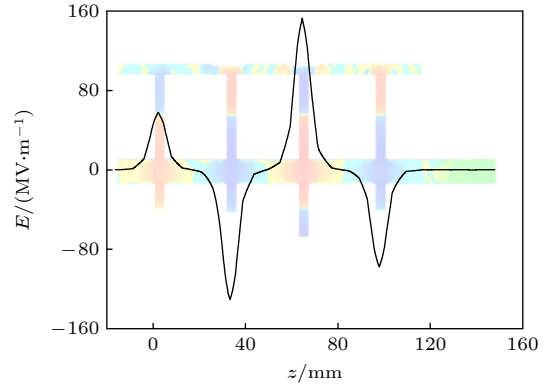


图 6 电场强度分布图

Fig. 6. Distribution of electric field intensity.

图 7(a)—(d) 分别表示了在第 1—第 4 周期以及不同时刻下模型的 4 个腔体中工作电压线与色散曲线的同步情况.由于第 1 腔的调制深度较低,因此在 5 ns 和 10 ns 时刻的工作电压线几乎重叠,在 24 ns 时刻的频率有所下降;第 2 腔的调制深度相较于第 1 腔有所提高,因此在 10 ns 时刻的频率已经下降且几乎和 24 ns 时刻的频率相当;第 3 腔为输出腔,随着运行时长的延长,该腔的频率逐渐朝着  $3\pi$  模的频率靠近,由于 24 ns 时刻已经达到稳定输出的阶段,因此在稳定工作时第 3 腔处于  $3\pi$  模的工作模式,电压线与  $3\pi$  模频点相交;第 4 腔的频率也随着运行时长增加,并稳定于  $3\pi$  模的频率附件.

总体看来,4 个腔体的振荡频率随时间变化沿图 7 箭头所示向右移动,并且输出腔的频率处于色散曲线中  $3\pi$  模的对应频率.因此,在后续的三维粒子仿真模拟中,选用了 450 kV 附近电压作为束-波互作用的工作电压范围.

## 4 束波互作用分析

本部分利用三维粒子仿真软件,对基于 RSWS 构建的高功率微波 REIO 辐射源进行了研究,该 REIO 模型与图 5 一致,全长约为 164.3 mm.在 PIC 仿真中,主要研究了束电压对功率和效率的影响.仿真环境为:边界条件为电边界,模型中金属壁为

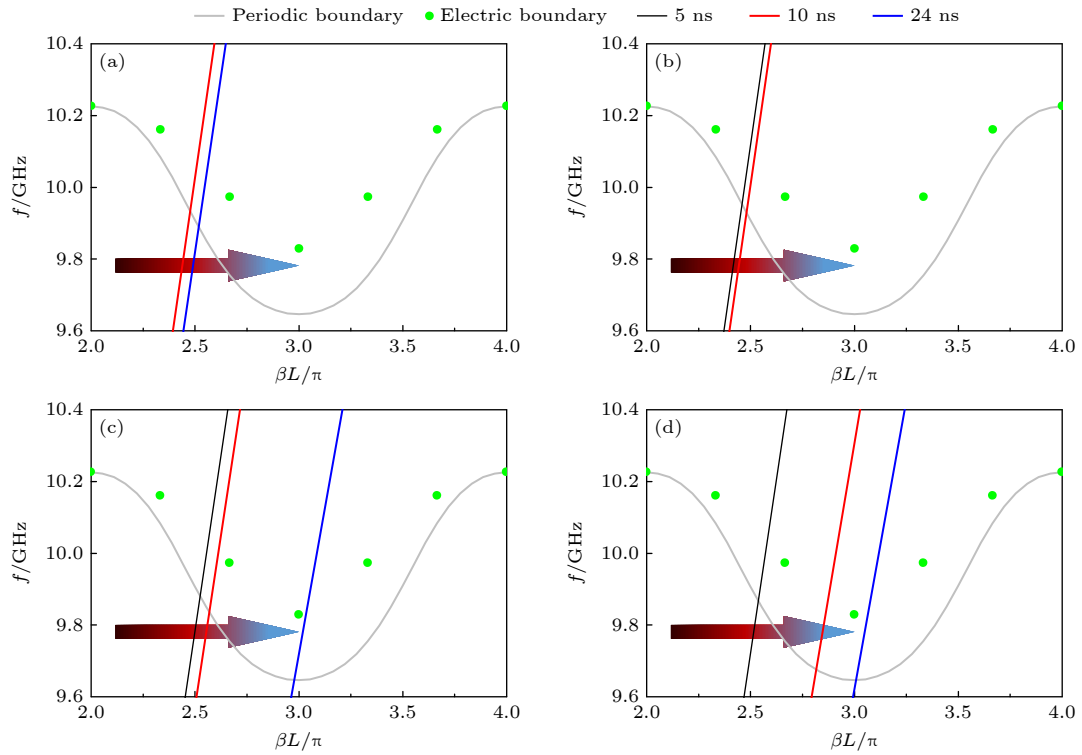


图 7 各腔的色散特性曲线 (a) 第 1 腔; (b) 第 2 腔; (c) 第 3 腔; (d) 第 4 腔

Fig. 7. Dispersion characteristics of each cavity: (a) The 1st cavity; (b) the 2nd cavity; (c) the 3rd cavity; (d) the 4th cavity.

纯铜 (具有电导率  $5.8 \times 10^7$  S/m), 网格数为 702150 个, 宏粒子数为 197409 个. 图 8 所示为模型在 440—460 kV 注电压条件下的功率变化和效率变化. 由图 8 可知, 随着电压的升高, 输出功率逐渐增加, 效率先增后减. 其中, 在 458—460 kV 条件下的输出功率达到约 72.5 MW, 对应电子效率约为 39.4%. 在电压为 448 kV 时电子效率最高, 达到了 39.8%, 对应输出功率为 71.6 MW.

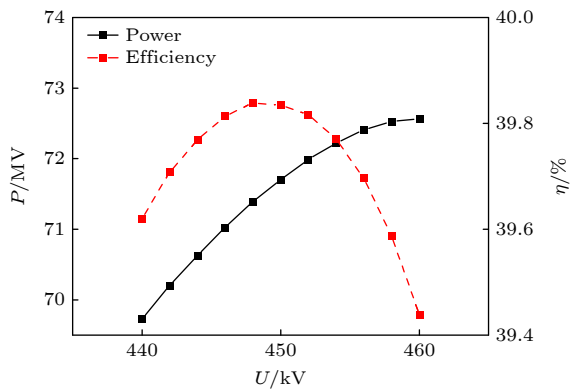


图 8 不同电压下的输出功率和效率

Fig. 8. Output power and efficiency with different voltage.

在 448 kV 束电压、400 A 束电流, 以及 0.4 T 磁场条件下, 该模型中电子速度的空间分布如图 9

所示. 观察速度变化可以看出, 电子在第 1 腔和第 2 腔时速度得到提高, 这是由于电子被激发的高频电场调制, 从电磁场中得到了能量; 电子在第 3 腔时速度急速下降, 这是由于电子将动能转化为电磁波, 以微波的形式从输出口输出.

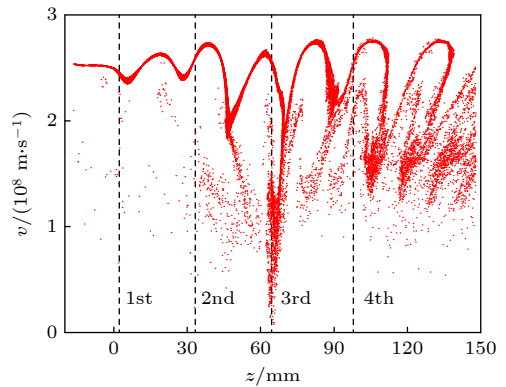


图 9 电子在 z 方向的速度分布

Fig. 9. Distribution of electron velocity in the z-direction.

图 10 为不同时刻下, 各腔的电场进行傅里叶变化后得到的频谱图. 从图 10 可以看出, 在第 1 腔、第 2 腔和第 3 腔中腔体激励的电场频率随时间逐渐下降, 在 REIO 功率饱和时 (20 ns 之后) 电场频率稳定在了 9.8 GHz, 说明此时模型运行在  $3\pi$

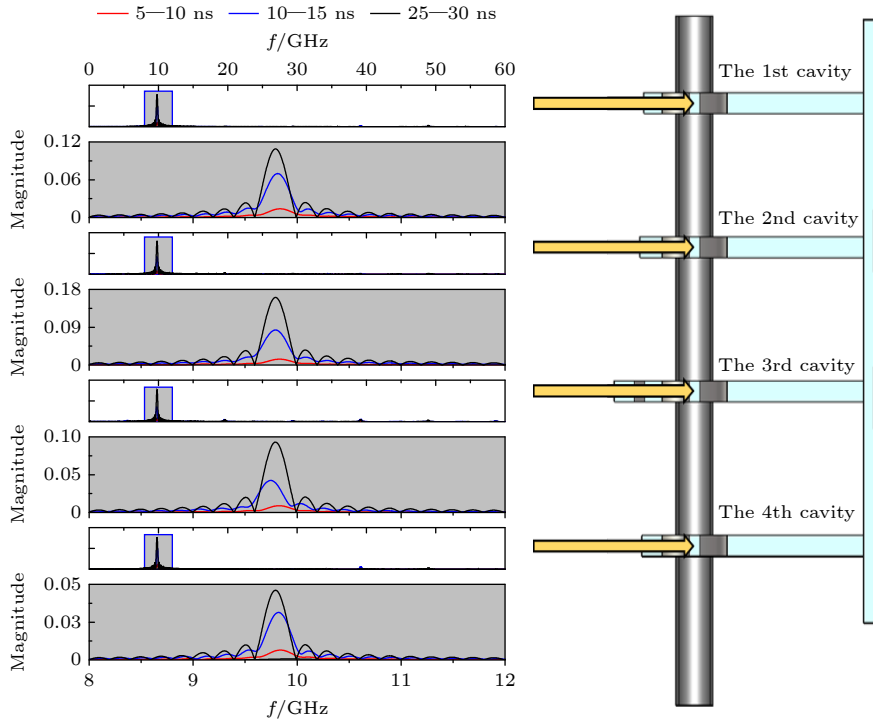


图 10 各腔在不同时刻的频谱图

Fig. 10. Frequency spectrum of each cavity in different time.

模, 与图 7 中的色散图对应. 而第四腔中的电场频率则随时间变化逐渐升高, 并在功率饱和时, 电场频率同样稳定在了 9.8 GHz.

对应地, 该模型的输出功率曲线和频谱分析分别如图 11 和图 12 所示. 在 10 ns 时, 该 REIO 达到起振状态; 在 17.5 ns 时, 器件的输出功率逐渐稳定, 平均功率维持在 71.39 MW, 效率约为 39.84%. 另外, 由图 12 的输出端口的频谱傅里叶分析曲线可知, 输出微波频谱纯净, 输出频率约为 9.8 GHz.

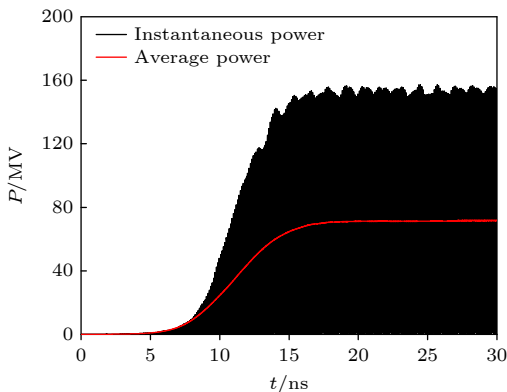


图 11 输出功率

Fig. 11. Output power.

为体现器件的轴向紧凑性, 表 2 对比了几个典型 HPM 器件的性能参数. 四种器件的效率均在

40% 左右, 而本文所研究的器件相互作用长度更短, 说明该器件单位长度内的注波相互作用强度更高, 具有紧凑的束波相互作用结构. 对高功率微波器件的小型化有一定参考价值.

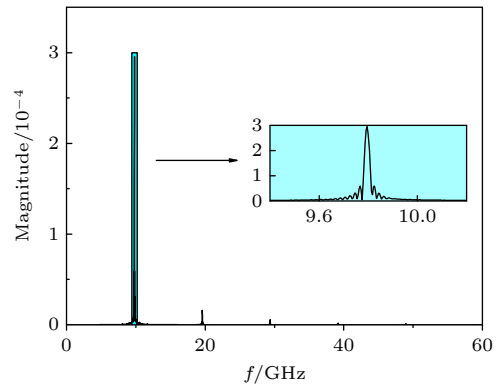


图 12 输出腔频谱图

Fig. 12. Frequency spectrum of output port.

表 2 几个典型高功率微波器件的性能参数  
Table 2. Performance parameters of several typical HPM devices.

文献	波段	长度 $L$ /mm	功率 $P$	效率/%
[8]	X	330	3 MW	>41
[10]	X	250	1.2 GW	40
[19]	X	200	3.65 GW	>30
本文	X	164.3	72.8 MW	39.84

## 5 结 论

本文研究了一种以 T 形波导单元周期排布的 RSWS. 首先通过镜像法分析了 T 形波导的特征频率. 通过对比分析发现, T 形波导的特征模频率可与脊波导的高阶模式频率相对应, 由此得到了 T 形波导特征模频率与尺寸的关系, 从而构建了以 T 形波导为单元的 RSWS; 进而对 T 形四周期 RSWS 进行了色散特性分析, 结果表明该结构在  $3\pi$  模稳定工作; 最后基于 T 形四周期 RSWS 进行了 REIO 辐射源的设计, 通过电磁仿真软件对模型进行了三维粒子仿真模拟. 在 448 kV 束电压、400 A 束电流, 以及 0.4 T 磁场的条件下, 得到了输出功率为 71.39 MW, 输出效率为 39.84%, 中心频率为 9.8 GHz 的稳定高功率微波输出. 本文提出的基于 T 形周期 RSWS 具有较少周期, 可为高效率、高功率微波辐射源提供有效的高频结构紧凑化方案.

## 参考文献

- [1] Benford J, Swegle J A 2008 High Power Microwave (2nd Ed.) (Chinese Version) (translated by Jiang W H, Zhang C) (Beijing: National Defense Industry Press) pp35–92 (in Chinese) [Benford J, Swegle J A 2008 高功率微波 (第二版)(中译本) (江伟华, 张弛 译) (北京: 国防工业出版社) 第 35—92 页]
- [2] Ding Y G 2020 *Vacuum Electronics* **344** 1 (in Chinese) [丁耀根 2020 *真空电子技术* **344** 1]
- [3] Liu Z B, Huang H, Jin X, Li S F, Wang T F, Fang X H 2019 *IEEE T. Electron. Dev.* **66** 722
- [4] Yang F X, Dang F C, Ge X J, He J T, Ju J C, Zhang X P 2022 *IEEE T. Electron. Dev.* **69** 7074
- [5] Ju J C, Zhang J, Shu T, Zhong H H 2017 *IEEE Electr. Device L.* **38** 270
- [6] Yang D W, Chen C H, Shi Y C, Xiao R Z, Teng Y, Fan Z Q, Liu W Y, Song Z M, Sun J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 164102 (in Chinese) [杨德文, 陈昌华, 史彦超, 肖仁珍, 滕雁, 范志强, 刘文元, 宋志敏, 孙钧 2020 *物理学报* **69** 164102]
- [7] Huang H, Wu Y, Liu Z B, Yuan H, He H, Li L L, Li Z H, Jin X, Ma H G 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 088402 (in Chinese) [黄华, 吴洋, 刘振帮, 袁欢, 何琥, 李乐乐, 李正红, 金晓, 马弘舸 2018 *物理学报* **67** 088402]
- [8] Wang J S, Li H T, Li D F 2022 *Vac. Electron.* **5** 24 (in Chinese) [王加松, 李洪涛, 李冬凤 2022 *真空电子技术* **5** 24]
- [9] Li S F, Huang H, Duan Z Y, Basu B N, Liu Z B, He H, Wang Z L 2022 *IEEE Electr. Device L.* **43** 131
- [10] Song W, Liu G Z, Lin Y Z, Shao H 2008 *High Power Laser Particle Beams* **20** 1322 (in Chinese) [宋玮, 刘国治, 林郁正, 邵浩 2008 *强激光与粒子束* **20** 1322]
- [11] Liu Z B, Zhao Y C, Huang H, Jin X, Lei L R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 108404 (in Chinese) [刘振帮, 赵欲聪, 黄华, 金晓, 雷禄容 2015 *物理学报* **64** 108404]
- [12] Liu Z B, Lei L R, Huang H, Jin X, Yuan H 2015 *High Power Laser Part. Beams* **27** 142 (in Chinese) [刘振帮, 雷禄容, 黄华, 金晓, 袁欢 2015 *强激光与粒子束* **27** 142]
- [13] Huang H, Luo X, Lei L R, Luo G Y, Zhang B Z, Jin X, Tan J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1907 (in Chinese) [黄华, 罗雄, 雷禄容, 罗光耀, 张北镇, 金晓, 谭杰 2010 *物理学报* **59** 1907]
- [14] Xie W Q, Wang Z C, Luo J R, Liu Q L, Li X X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014101 (in Chinese) [谢文球, 王自成, 罗积润, 刘青伦, 李现霞 2014 *物理学报* **63** 014101]
- [15] Xian J Y, Fang J J 2010 *Vac. Electron.* **2010** 33 (in Chinese) [邢俊毅, 冯进军 2010 *真空电子技术* **2010** 33]
- [16] Wang D, Chen D B, Qin F, Fan Z K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6962 (in Chinese) [王冬, 陈代兵, 秦奋, 范植开 2009 *物理学报* **58** 6962]
- [17] Ge X J, Zhong H H, Qian B L, Zhang J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2645 (in Chinese) [葛行军, 钟辉煌, 钱宝良, 张军 2010 *物理学报* **59** 2645]
- [18] Liu Z B, Huang H, Jin X, Wang T F, Li S F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 218401 (in Chinese) [刘振帮, 黄华, 金晓, 王腾飏, 李士锋 2020 *物理学报* **69** 218401]
- [19] Zhang P, Shu T, Dang F C, Ge X j, Song L L, Yang F X, He J T 2022 *IEEE T. Plasma Sci.* **50** 3557
- [20] Chen S Q, Hu L, Lin W G 1992 *J. UEST. China* **21** 11 (in Chinese) [陈树强, 胡力, 林为干 1992 *电子科技大学学报* **21** 11]
- [21] Zhang K C, Wu Z H, Liu S G 2009 *J. Infrared Milli Terahz. Waves* **30** 309
- [22] Shao Y 2017 *M. S. Thesis* (Hefei: Hefei University of Technology) (in Chinese) [邵玉 2017 硕士学位及论文 (合肥: 合肥工业大学)]
- [23] Zhang K C 2009 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [张开春 2009 硕士学位及论文 (成都: 电子科技大学)]

# Analysis and simulation of X-band high-power microwave generation based on T-shaped four-period slow-wave structure\*

Luo Xin-Yao    Xue Yu-Zhe    Xu Che<sup>†</sup>    Du Chuang-Zhou    Liu Qing-Xiang

(School of Physical Sciences and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

( Received 6 December 2023; revised manuscript received 4 February 2024 )

## Abstract

In this study, a T-shaped, four-period resonant slow-wave structure is optimally designed, and its high-frequency performance is comprehensively analyzed in theory. By using the image theory, the T-shaped waveguide unit is transformed into an equivalent ridge waveguide configuration. The high-frequency characteristics of the equivalent ridge waveguide, such as resonant frequency and structure of the T-shaped waveguide are analyzed by using equivalent circuit theory. The analysis has confirmed that in the ridge waveguide, starting from the second-highest order mode, the frequency points of the even-order modes are very consistent with those of the T-shaped waveguide; however, the odd-order modes have no such corresponding mode in the T-shaped waveguide, for they do not fulfill the electric boundary conditions required by the image method. On this basis, a T-shaped four-period resonant slow-wave structure is constructed, and its dispersion characteristics are analyzed to determine the resonant modes and frequencies, as well as the range of mode synchronization voltages. Simulations are subsequently performed to validate the effectiveness of the relativistic extended interaction radiation source, which includes the novel T-shaped periodic resonant slow-wave structure. Advanced three-dimensional particle simulations, in conjunction with optimization techniques show that a high-power microwave output at a frequency of 9.8 GHz, is achieved, which can deliver an average power of 71.4 MW. This output is attained under the conditions of a 448 kV beam voltage, 400 A beam current, and a 0.4 T uniform axial magnetic field, with an electron efficiency reaching 39.8%. This structure, characterized by the T-shaped waveguide, is demonstrated to be capable of producing high-efficiency, high-power microwaves with fewer periods, presenting a compact and efficient solution for generating high-power microwaves in advanced scientific applications.

**Keywords:** high-power microwave source, extended interaction, slow-wave structure, transit radiation oscillator

**PACS:** 41.20.-q, 84.40.Fe, 84.47.+w

**DOI:** [10.7498/aps.73.20231921](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231921)

\* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2682023CX076), the Open Topics Fund of the High-Power Microwave Technology Innovation Workstation (Grant No. W031229901), and the Natural Science Foundation of Sichuan Province, China (Grant No. 24NSFSC7256).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xuche@swjtu.edu.cn](mailto:xuche@swjtu.edu.cn)

基于T形四周期谐振慢波结构的X波段高功率微波产生技术的理论与仿真

骆新耀 薛宇哲 徐彻 杜创洲 刘庆想

**Analysis and simulation of X-band high-power microwave generation based on T-shaped four-period slow-wave structure**

Luo Xin-Yao   Xue Yu-Zhe   Xu Che   Du Chuang-Zhou   Liu Qing-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 094101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231921

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231921>

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

锁频锁相的高功率微波器件技术研究

Review on high power microwave device with locked frequency and phase

物理学报. 2018, 67(8): 088402 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172684>

高功率微波输出窗内侧击穿动力学的PIC/MCC模拟研究

PIC/MCC simulation of breakdown dynamics inside high power microwave output window

物理学报. 2018, 67(22): 225201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181260>

反馈型 $TM_{01}$ 主模同轴虚阴极振荡器

$TM_{01}$  dominant mode coaxial virtual cathode oscillator with feedback construction

物理学报. 2019, 68(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190696>

过模返波管的正反馈机制

Feedback process study in over-sized backward wave oscillator

物理学报. 2019, 68(5): 054103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181897>

X波段高重频长脉冲高功率多注相对论速调管放大器的设计与实验研究

Design and experiment of X-band high-repetition rate high-power multi-beam relativistic klystron amplifier

物理学报. 2020, 69(21): 218401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201013>

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>