

分布式损耗加载和导引中心调节对 TE_{11} 模工作 回旋行波管稳定性影响的多模稳态分析

彭澍源^{*①②} 王秋实^{①②} 张兆传^① 罗积润^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文利用多模稳态非线性理论, 研究损耗材料加载和导引中心半径调节对回旋行波管稳定性改善的效果。结果表明, 随着损耗材料电导率的减小返波振荡强度逐渐减小直至完全消失, 同时工作模式输出功率显著增大; 适当增大导引中心半径后, 完全抑制返波振荡需要的损耗更小, 可以减轻热损耗散热的困难, 同时还能减小管子输出性能对电导率变化的敏感性。

关键词: 回旋行波管; 多模稳态; 分布式损耗; 导引中心半径; 返波振荡

中图分类号: TN128; TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)09-2260-05

DOI: 10.11999/JEIT150192

Effects of Distributed Loss Loading and Guiding Center Radius Modifying on Stability of Gyro-traveling Wave Tube

Peng Shu-yuan^{①②} Wang Qiu-shi^{①②} Zhang Zhao-chuan^① Luo Ji-run^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the effect of distributed loss loading and guiding center radius modifying on the stability of a TE_{11} mode Gyro-Traveling Wave Tube (Gyro-TWT) is studied by multimode steady-state method. The result shows that the output power of the backward oscillation mode keeps weaken till zero as the conductance of the lossy material reduces, while the output power of the working mode grows significantly. As guiding center radius increases, loss loading needed to suppress oscillation completely is weaker, which makes heat easier to dissipate. Besides, the increment of guiding center radius also makes the output characteristic less sensitive to conductance variation.

Key words: Gyro-Traveling Wave Tube (Gyro-TWT); Multimode steady-state; Distributed loss; Guiding center radius; Backward wave oscillation

1 引言

回旋管(Gyrotron)是一类基于电子回旋脉塞(Electron Cyclotron Maser)的快波器件,能够在毫米波和远红外波段产生高功率,适当填补了传统微波器件和激光器件在这个频带空隙的不足^[1]。经过几十年的发展,回旋器件在理论研究和工程实现上都取得了重大进展,被广泛应用于等离子体加热、粒子加速器、高精度雷达、宽带通信和医疗设备等领域^[2-10]。回旋行波管(Gyro-Traveling Wave Tube, Gyro-TWT)是回旋管家族中重要的一员。它利用波导作为相互作用结构,具有较大的工作带宽,但同时也容易产生各种寄生振荡,影响工作稳定性^[2,3,11,12]。

对寄生振荡的研究贯穿于整个回旋行波管的发

展过程中,人们从理论和实验方面对此进行了大量研究,提出了一些有效地抑制振荡、提高稳定性的方法。1996年,文献[13]在Ku波段研制的 TE_{21} 模二次谐波回旋行波管,结合轴向开槽模式选择相互作用电路抑制角向模数为奇数的模式,实现了207 kW输出功率和零驱动稳定(zero-drive stable)工作。2003年,文献[14]利用共焦波导(confocal waveguide)作为回旋行波管相互作用结构,采用2维光子晶体组成波导壁。由于光子晶体的带隙特性,其开放壁对远离工作频率的模式具有很大的绕射损耗,可以实现高次模式单模稳定运行。该管实现了 HE_{06} 模单模稳定工作,在W波段获得了27 kW峰值功率。

上述抑制振荡的方法都需要构造新型的相互作用电路,其中的高频场形状相对圆波导中的场发生了很大变化,使得对注波相互作用分析更加困难。在波

导内壁加载损耗材料是一种使用简单且效果良好的抑制振荡的方法。1995年,文献[15]计算了其他参数相同时,分别采用光滑无损波导、截断式波导和分布式损耗波导的 TE₁₁ 基波回旋行波管中 TE₂₁⁽²⁾ 返波振荡的起振电流,分别为 0.1 A、0.9 A 和 26 A,证明了分布式损耗波导对于回旋行波管中的返波振荡具有明显的抑制作用。1999年,文献[12]研制出一支 Ka 波段 TE₁₁ 基波回旋行波管,利用石墨涂敷分布式损耗波导作为互作用电路,实现了 93 kW 饱和输出功率,增益达到了 70 dB。2002~2004年,文献[16,17]研制出一支 W 波段 TE₀₁ 基波回旋行波管,采用陶瓷加载分布式损耗波导,实现了 59 kW 饱和输出功率和 42 dB 增益。

除了加载损耗之外,调节回旋行波管的工作参数也能改变模式竞争状况。导引中心半径对注波耦合强度有明显影响,适当调节导引中心半径可以改变各个模式与电子耦合强度的相对大小,从而使特定的模式在模式竞争中获得优势。在 TE₁₁ 基波工作的回旋行波管中,适当增大导引中心半径可以在不加载损耗的情况下减小 TE₂₁⁽²⁾ 返波振荡功率直至其完全消失,同时使得工作模式输出功率明显增加^[18]。

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + k_z^2 \right) f_l(z) = \frac{2I_b k_{il}}{\pi r_w^2 K_l} \left(\sum_{i=1}^N W_i \frac{v_{ti} J'_{s_l}(k_{il} r_{Li}) J_{m_l-s_l}(k_{il} r_{ci}) e^{-i\omega_l t_i + i(m_l-s_l)\phi_{ci} + is_l\theta_i}}{v_{zi}} \right) \quad (1)$$

其中 $f_l(z)$ 为第 l 个模式的振幅, k_{zl} 为轴向波数, k_{il} 为截止波数, I_b 为注电流, r_w 为波导半径, $K_l = (1 - m_l^2 / \chi_{m_l m_l}^2) J_{m_l}^2(\chi_{m_l m_l})$, J 为第一类贝塞尔函数, ω_l 为角频率, W_i 为第 i 个电子的权重因子, r_{Li} 为拉莫

这一方法为抑制振荡提供了一种加载损耗之外的新思路。

本文利用多模理论计算加载不同电导率损耗材料时寄生振荡模式和工作模式的输出功率;结合对导引中心半径的调节,分析不同导引中心半径情况下损耗材料电导率对模式竞争的影响,比较两种不同导引中心半径时完全抑制返波振荡所需要的电导率大小。

2 理论模型

回旋行波管的多模稳态理论用来分析圆波导中高频场和回旋电子之间互作用的情况。同时考虑多个模式与电子之间的能量交换,该理论可以研究回旋行波管中的模式竞争。基于如下基本假设,该理论由麦克斯韦方程组和带电粒子运动方程经过数学推导得到:(1)高频场的横向分布不受电子存在的影响,其振幅只在轴向发生变化;(2)不考虑电子之间的空间电荷力。

多模稳态理论是一种非线性自治理论,由 N 个场演化方程 (N 为高频场数量) 和 6 个电子演化方程组成。式(1)为第 l 个模式的场演化方程^[18]:

半径, r_{ci} 为导引中心半径, v_{ti} 为横向速度, v_{zi} 为轴向速度, ϕ_{ci} 为导引中心角, θ_i 为回旋角, t_i 为进入时间。

式(2)为电子演化方程^[18]:

$$\frac{dp_z}{dz} = m_e c g \frac{\beta_t^2}{\beta_z} + \frac{e\mu_0 v_t}{v_z} \operatorname{Re} \left\{ \sum_l \frac{1}{k_{il}} f'_l(z) J'_{s_l}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l}(k_{il} r_c) e^{i\omega_l t - i(m_l-s_l)\phi_c - is_l\theta} \right\} \quad (2a)$$

$$\frac{dp_t}{dz} = m_e c g \beta_t - \frac{e\mu_0}{v_z} \operatorname{Re} \left\{ \sum_l \frac{1}{k_{il}} (i\omega_l f_l(z) + v_z f'_l(z)) J'_{s_l}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l}(k_{il} r_c) e^{i\omega_l t - i(m_l-s_l)\phi_c - is_l\theta} \right\} \quad (2b)$$

$$p_t \left(\frac{d\theta}{dz} - \frac{eB_0}{p_z} \right) = -\frac{e\mu_0}{v_z} \operatorname{Re} \left\{ \sum_l \frac{1}{k_{il}^2} \left(\frac{s_l \omega_l}{r_L} f_l(z) - k_{il}^2 v_t f_l(z) - \frac{is_l}{r_L} v_z f'_l(z) \right) \times J_{s_l}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l}(k_{il} r_c) e^{i\omega_l t - i(m_l-s_l)\phi_c - is_l\theta} \right\} \quad (2c)$$

$$\frac{dr_c}{dz} = -gr_c + \frac{\mu_0}{B_0 v_z} \sum_l \left\{ \frac{1}{k_{il}} J_{s_l}(k_{il} r_L) J'_{m_l-s_l}(k_{il} r_c) \cdot \operatorname{Re} \left[(v_z f'_l(z) + i\omega_l f_l(z)) e^{i\omega_l t - i(m_l-s_l)\phi_c - is_l\theta} \right] - \left[J_{s_l-1}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l+1}(k_{il} r_c) - J_{s_l+1}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l-1}(k_{il} r_c) \right] \cdot \operatorname{Im} \left[\frac{1}{2} v_t f_l(z) e^{i\omega_l t - i(m_l-s_l)\phi_c - is_l\theta} \right] \right\} \quad (2d)$$

$$r_c \frac{d\phi_c}{dz} = \frac{\mu_0}{B_0 v_z} \sum_l \left\{ \frac{1}{k_{il}^2} \frac{m_l - s_l}{r_c} J_{s_l}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l}(k_{il} r_c) \cdot \operatorname{Im} \left[(v_z f'_l(z) + i\omega_l f_l(z)) e^{i\omega_l t - i(m_l-s_l)\phi_c - is_l\theta} \right] - \left[J_{s_l-1}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l+1}(k_{il} r_c) + J_{s_l+1}(k_{il} r_L) J_{m_l-s_l-1}(k_{il} r_c) \right] \cdot \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} v_t f_l(z) e^{i\omega_l t - i(m_l-s_l)\phi_c - is_l\theta} \right] \right\} \quad (2e)$$

$$\frac{dt}{dz} = \frac{1}{v_z} \quad (2f)$$

式(2a)为电子轴向动量演化方程,式(2b)为横向动量演化方程,式(2c)为回旋角演化方程,式(2d)为导引中心半径演化方程,式(2e)为导引中心角演化方程,式(2f)为时间(相位)演化方程。其中 $\beta_t = \frac{v_t}{c}$, $\beta_z = \frac{v_z}{c}$, $g = \frac{1}{2B_0} \frac{dB_0}{dz}$ 表示静磁场沿轴向的变化率, μ_0 为真空磁导率。

为了引入波导壁损耗,将截止波数 k_{cl} 替换为^[12]

$$k_{cl} = k_{cl0} \sqrt{1 - (1-i) \frac{\delta}{r_w} \left(1 + \frac{m^2}{\chi_{mm}^2 - m^2} \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right)} \quad (3)$$

其中 k_{cl0} 为无损耗时的截止波数, δ 为损耗材料趋肤深度, χ_{mm} 为第 m 阶贝塞尔函数导数的第 n 个根。

3 结果和分析

本文对一支 TE_{11} 基波回旋行波管进行分析,参数如下:注电压 $V_b = 100$ kV,注电流 $I_b = 10$ A,速度比 $\alpha = 0.85$,波导半径 $r_w = 0.2659$ cm,波导长度 $L = 17.46$ cm,损耗段长度 $L_{loss} = 14$ cm,磁场 $B_0 = 1.254$ T。图 1 为其色散曲线。

如图 1 所示, TE_{11} 基波回旋行波管中容易出现的不稳定性是 $TE_{21}^{(2)}$ 返波振荡(图 1 中点 2)和 $TE_{11}^{(2)}$ 返波振荡(图 1 中点 3)。利用单模理论^[19]算得 $TE_{11}^{(2)}$ 返波振荡的起振电流为 0.17A, $TE_{21}^{(2)}$ 返波振荡的起振电流为 20.10 A,因此电流为 10 A 时只有 $TE_{21}^{(2)}$ 返波振荡出现,下面仅分析 $TE_{21}^{(2)}$ 返波振荡对工作模式的影响。

在波导内壁涂敷损耗材料是有效地抑制振荡的方法。利用多模稳态理论计算了导引中心半径

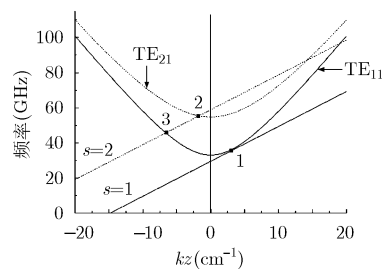


图 1 色散曲线

$r_c = 0.45r_w$ 情况下加载不同电导率的损耗材料时 $TE_{11}^{(1)}$ 工作模式和 $TE_{21}^{(2)}$ 返波振荡模式的输出功率随输入功率的变化,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,减小损耗材料电导率和增大输入功率在一定范围内可以削弱 $TE_{21}^{(2)}$ 返波振荡。当电导率从 1×10^6 S/m 减小到 1×10^5 S/m 时(图 2(a)、图 2(b)),返波振荡功率有一定的减少,但工作模式 $TE_{11}^{(1)}$ 的输出功率也相应减少,两者的输出基本是在相同量级上;当输入功率大到一定程度后,工作模式出现过饱和使输出下降明显,而返波振荡输出变化却非常小。当电导率继续减小至 1×10^4 S/m 左右(图 2(c)~图 2(e))后,电导率的减小对削弱返波振荡更为有效,工作模式输出功率是返波振荡的 3 个量级以上;随着输入功率增大返波振荡被完全抑制,工作模式的饱和输出功率和增益都出现较大提高,且电导率的减小会使得保持稳定工作的输入功率减小,同时工作模式的输出功率和增益都增加。这说明来自返波振荡对工作模式注波互作用的影响远比电导率降低产生的损耗严重得多。电导率进一步减小到 9×10^3 S/m 时(图 2(f)),管子进入零驱动稳定状态,饱和输出功率进一步提高到 239 kW,增益超过 50 dB。

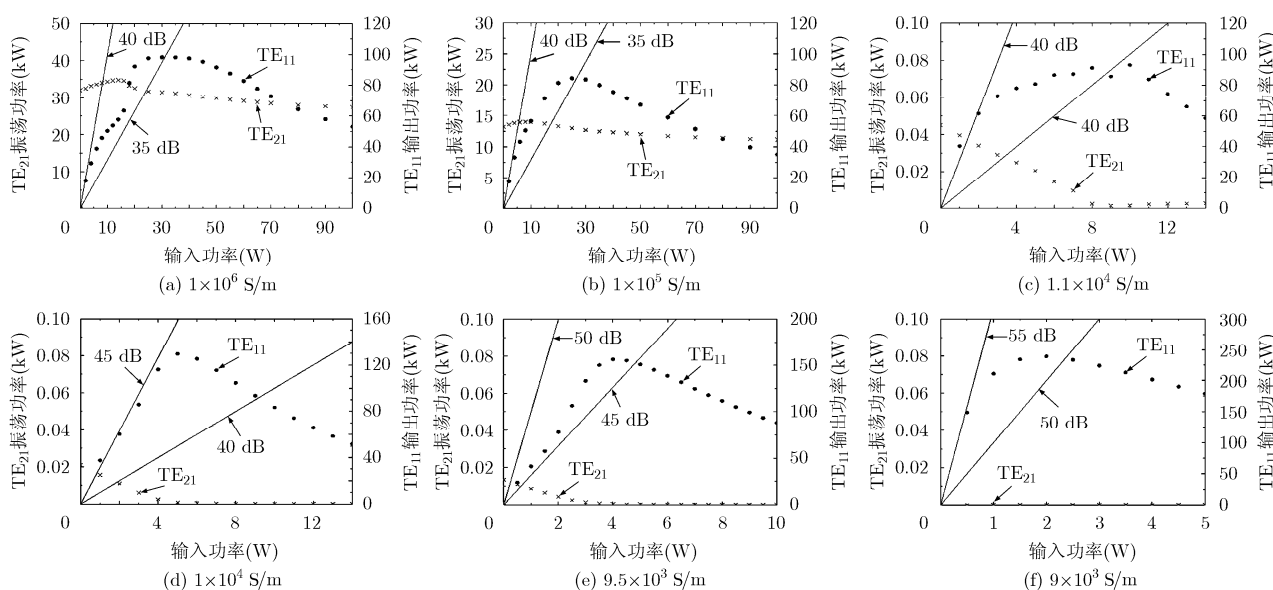


图 2 $r_c/r_w = 0.45$ 时, $TE_{11}^{(1)}$ 和 $TE_{21}^{(2)}$ 的输出功率大小随输入功率的变化

调节导引中心半径可以在对工作模式注波耦合影响相对小的情况下对返波振荡模式耦合有很强的减弱^[18]。图3给出了不同导引中心半径时衰减材料电导率对回旋行波管工作特性的影响。图3(a)为工作模式饱和输出功率大小随电导率的变化,图3(b)为工作模式饱和输出时TE₂₁⁽²⁾返波振荡模式输出功率随电导率的变化。

如图3所示,在 $r_c/r_w = 0.45$ 和 $r_c/r_w = 0.65$ 两种情况下,TE₂₁⁽²⁾返波振荡都随着电导率的减小逐渐变弱直至完全消失,振荡完全消失后工作模式饱和输出功率出现了明显的增大。在 $r_c/r_w = 0.45$ 的情况下电导率为 9×10^3 S/m时可以完全抑制返波振荡,达到零驱动稳定,此时工作模式饱和输出功率为239 kW;而在 $r_c/r_w = 0.65$ 的情况下电导率为 3×10^4 S/m时就可以完全抑制返波振荡,达到零驱动稳定,此时工作模式饱和输出功率为253 kW。更大的电导率意味着损耗材料吸收的能量更少,在高平均功率工作时可以减小热耗散的困难。因此适当增大导引中

心半径可以降低完全抑制振荡所需的损耗加载,减小散热困难,同时提高工作模式饱和输出功率。此外,从图3(a)中还可以看出:在 $r_c/r_w = 0.45$ 的情况下当电导率相对于完全抑制振荡(零驱动稳定)所需的电导率略微增大时,工作模式饱和输出功率会迅速下降;而在 $r_c/r_w = 0.65$ 的情况下,电导率超出零驱动稳定电导率后工作模式饱和输出功率下降速率相对变慢。显然,后者对工程设计参数精度敏感性要求将可能有所降低。

4 结束语

本文基于多模稳态理论,研究了损耗材料电导率和导引中心半径对TE₁₁模基波回旋行波管稳定工作的影响。结果表明,除了损耗材料电导率降低和输入信号功率增强可以有效抑制返波振荡之外,适当增大导引中心半径可以在降低损耗加载强度的基础上保持工作模式稳定,增加信号输出功率和增益,减小输出性能对工作参数变化的敏感性,降低损耗加载散热难度。

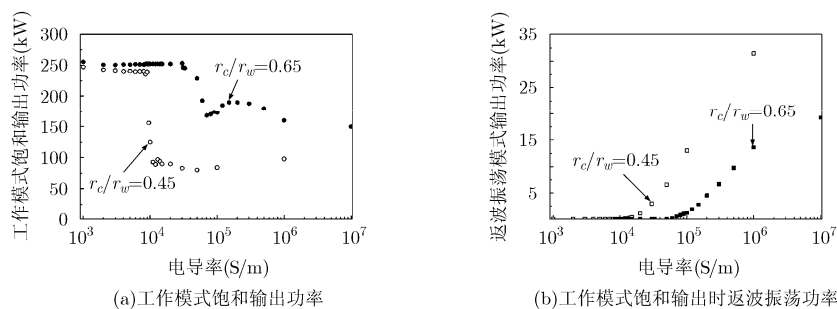


图3 导引中心半径为 $0.45r_w$ 和 $0.65r_w$ 时,衰减材料电导率变化对工作特性的影响

参考文献

- [1] 刘盛纲. 相对论电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-2.
- [2] Lau Y Y, Chu K R, Barnett L R, *et al.* Gyrotron traveling wave amplifier I: analysis of oscillations[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1981, 2(3): 373-392.
- [3] Barnett L R, Chang L H, Chen H Y, *et al.* Absolute instability competition and suppression in a millimeter-wave gyrotron traveling wave tube[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 63(10): 1062-1065.
- [4] 薛智浩, 刘濮鲲, 杜朝海, 等. W波段螺旋波导回旋行波管注波互作用的非线性分析[J]. *物理学报*, 2014, 63(8): 080201.1-080201.8.
Xue Zhi-hao, Liu Pu-kun, Du Chao-hai, *et al.* Research on non-linear beam-wave interaction of W-band Gyro-TWT with helical waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 080201.1-080201.8.
- [5] Tang Y, Luo Y, Xu Y, *et al.* Self-consistent nonlinear analysis and 3D particle-in-cell simulation of a W-band gyro-TWT[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahz Waves*, 2014, 35(10): 799-812.
- [6] Wang J X, Luo Y, Xu Y, *et al.* Numerical design and optimization of a curved collector for a Q-band gyro-TWT[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 61(1): 147-150.
- [7] Denisov G G, Samsonov S V, Mishakin S V, *et al.* Microwave system for feeding and extracting power to and from a gyro-TWT through one window[J]. *IEEE Electron Devices Letters*, 2014, 35(7): 789-791.
- [8] Wang J X, Luo Y, Xu Y, *et al.* Simulation and experiment of a Ku-band gyro-TWT[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 61(6): 1818-1823.
- [9] Alaria M K, Choyal Y, and Sinha A K. Design of a Ka-band

- gyro-TWT amplifier for broadband operation[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(7): 073110.1-073110.6.
- [10] Yan R, Tang Y, Luo Y, *et al.* Design and experimental study of a high-gain W-band gyro-TWT with nonuniform periodic dielectric loaded waveguide[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 61(7): 2564-2569.
- [11] Chu K R, Barnett L R, Chen H Y, *et al.* Stabilization of absolute instabilities in the gyrotron traveling wave amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(7): 1103-1106.
- [12] Chu K R, Chen H Y, Hung C L, *et al.* Theory and experiment of ultrahigh-gain gyrotron traveling wave amplifier[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, 27(2): 391-404.
- [13] Wang Q S, McDermott D B, and Luhmann N C Jr. Operation of a stable 200-kw second-harmonic Gyro-TWT amplifier[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1996, 24(3): 700-706.
- [14] Sirigiri J R, Shapiro M A, Temkin R J, *et al.* High-power 140-GHz quasioptical gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(25): 258302.1-258302.4.
- [15] Chu K R, Barnett L R, Chen H Y, *et al.* Stabilization of absolute instabilities in the gyrotron traveling wave amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(7): 1103-1106.
- [16] McDermott D B, Song H H, Hirata Y, *et al.* Design of a W-Band TE₀₁ mode gyrotron traveling-wave amplifier with high power and broad-band capabilities[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(3): 894-902.
- [17] Song H H, McDermott D B, Hirata Y, *et al.* Theory and experiment of a 94 GHz gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(5): 2935-2941.
- [18] 彭澍源, 王秋实, 张兆传, 等. 回旋行波管多模稳态理论及初步应用[J]. *物理学报*, 2014, 63(20): 208401.1-208401.9.
- Peng Shu-yuan, Wang Qiu-shi, Zhang Zhao-chuan, *et al.* Multimode steady-state theory for Gyro-TWT and simulation of mode competition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(20): 208401.1-208401.9.
- [19] 焦重庆. 回旋行波放大器的相关理论与数值模拟[D]. [博士学位论文], 中国科学院研究生院, 2007.
- Jiao Chong-qing. Theoretical study and numerical simulation of the gyrotron traveling wave amplifier[D]. [Ph.D. dissertation], Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007.
- 彭澍源: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为高功率毫米波源与技术.
- 王秋实: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为高功率毫米波源与技术.
- 张兆传: 男, 1965 年生, 研究员, 研究方向为高功率微波源器件.
- 罗积润: 男, 1957 年生, 博士, 研究员, 研究方向为高功率毫米波源与技术.