

W 波段 TE₀₂ 模式回旋行波管带宽输入耦合器设计*

王哲远, 王峨锋

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 输入耦合器是回旋行波管的重要组成部分之一,其作用是将矩形波导 TE₁₀ 模式的信号,通过模式变换结构转换为回旋放大器件中的模式,输入耦合器性能的优劣直接影响了回旋管整管的带宽等性能。通过对 W 波段 TE₀₂ 模式回旋行波管的输入耦合器进行理论分析,指出影响主模传输损耗的一个因素是杂模的崛起使主模的传输系数降低,利用仿真软件进行仿真,通过优化耦合孔的尺寸,抑制杂模的产生,将损耗从 3.9 dB 降低到了 0.8 dB。根据优化尺寸加工,实际测试,得到 3.0 dB 带宽 7.9 GHz 的输入耦合器,与设计符合较好。

关键词: W 波段; 回旋行波管; TE₀₂ 模式; 输入耦合器; 冷测

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB201931.190367

Design of broad-band input coupler of W-band TE₀₂ mode gyro-TWT

Wang Zheyuan, Wang Efeng

(Vacuum Electronics National Laboratory, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, the input coupler for W-band gyro-TWT is designed to meet the needs of the signal transmission and mode conversion. The input coupler is potential device to be the essential section determining the bandwidth of the whole gyro-TWT. The theoretical analysis of the input coupler of the W-band TE₀₂ mode gyro-TWT is carried out. It is pointed out that one factor affecting the transmission loss of the main mode is that the rise of the miscellaneous modes reduces the transmission coefficient of the main mode, and simulation is done to suppress the miscellaneous modes by optimizing the sizes of the coupling hole, reducing the loss from 3.9 dB to 0.8 dB. According to the simulation sizes processing and cold testing, the final input coupler with 3 dB bandwidth of 7.9 GHz meets the design requirements.

Key words: W-band; gyro-TWT; TE₀₂ mode; input coupler; cold test

PACS: 84.40.lk

回旋行波管^[1]在毫米波波段输出功率高,平均功率高,带宽宽^[2-4]。W 波段(75~110 GHz)回旋行波管高功率微波放大器在军用中具有十分重要的应用前景。回旋行波管的潜在应用有高密度通讯、深空间雷达、高梯度直线对撞机、环境遥感和空间碎片的追踪等方面^[5]。

随着频率的升高,回旋行波管高频结构尺寸减小,当工作在 W 波段时,若采用 TE₀₁ 模式,相互作用及用作电子通道的截止段尺寸小。此截止段为整个回旋行波管尺寸最小处,半径仅为 1.65 mm,而电子注外半径为 1.15 mm,如果管体和磁体的同轴度稍有偏差,将极易发生电子截获现象,会严重影响管子的输出特性。因此研究高阶 TE₀₂ 模式作为 W 波段回旋行波管的工作模式对解决这一问题具有重要意义。在相同频率点,如果采用 TE₀₂ 模式,电子注最小通道处半径可扩大至 3 mm,使得电子截获问题得到极大的改进。

输入耦合器是回旋行波管高频系统的关键部件之一,它主要由输入波导、同轴腔、圆波导等组成,其中同轴腔与圆波导之间为耦合狭缝,输入耦合的功能是将外部矩形波导输入 TE₁₀ 模的高频信号转化为内腔工作模式的行波场,实现对回旋电子注的速度调制和密度调制^[6]。文献[7]中提出可以将耦合狭缝视为偶极子,通过偶极子理论获得初始值,再进行优化。其计算过程复杂,计算结果与仿真结果相比中心频率偏差较小,但 Q 值偏差极大。文献[8]中提出一种新的近似理论,并通过引入修正来反映耦合缝的影响,使得耦合器设计时间骤减。徐勇^[9]等人将其近似理论利用在了 Ka 波段 TE₀₁ 模式回旋行波管耦合器设计中,获得了 3 dB 带宽 3 GHz,并通过冷测实验验证

* 收稿日期:2019-09-19; 修订日期:2019-11-06

基金项目:航天预研项目(305050703)

作者简介:王哲远(1995—),男,硕士,主要从事高功率毫米波器件技术研究;757947212@qq.com。

了其设计方法的合理性。文献 [10] 中给出 Ka 波段 TE₀₂ 模式回旋速调管输入耦合器的研究成果, 该耦合器 3 dB 带宽 2%, 为 700 MHz, 文献 [11] 给出相同模式频段速调管耦合器的设计结果, 其中心频率为 34.2 GHz, 3 dB 带宽约 1.5%, 为 500 MHz。但对于 W 波段 TE₀₂ 模式回旋行波管输入耦合器的设计仍存在两个问题: 第一, 速调管本身就是窄带器件, 其输入耦合器的带宽设计只需要满足回旋速调管的工作带宽即可, 且在高阶模式下, 速调管只需要满足同轴腔与相互作用谐振腔的谐振频率匹配, 并且使不需要的模式谐振频率远离工作频率即可实现对杂模的抑制; 第二, 文献 [9] 使用近似理论用于 Ka 波段 TE₀₁ 模式耦合器设计中, 但 TE₀₁ 为基模, 模式纯度同样较好实现。而对于 W 波段 TE₀₂ 模式回旋行波管输入耦合器的设计, TE₀₁ 模式成为必然出现的杂模。本文根据实际制管需求, 通过近似理论得到耦合器初始参数, 通过进一步优化尺寸以抑制 TE₀₁ 模式, 设计最终得到传输损耗 0.8 dB, 3 dB 带宽 8.5% 的宽带回旋行波管输入模式耦合器。

1 理论分析

图 1 是 W 波段 TE₀₂ 模式回旋行波管输入耦合器示意图, 1 为输入波导, 2 为同轴腔, 3 为圆波导, 同轴腔与圆波导之间为耦合狭缝, r_a 与 r_b 分别为同轴腔内径与外径, d_c 与 d_k 分别为耦合缝宽与缝长, r 为波导半径, L 为同轴腔长度。耦合器左端开孔连接电子枪, 半径小于高频相互作用段, 对于工作频率截止, 是为了防止输入信号往电子枪方向传播, 右端连接相互作用段。耦合器的输入信号是矩形波导 TE₁₀ 模式, 可以通过同轴腔激励起的 TE_{N11} 模式经 N 个耦合孔在波导中建立 TE_{0n} 模式, 其中 $n=0, 1, 2, \dots$ 。在图 1 中同轴腔与

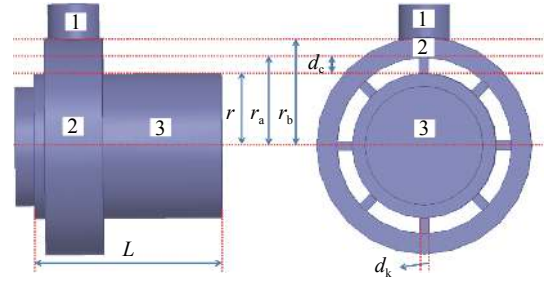


Fig. 1 Schematic diagram of the input coupler
图 1 输入耦合器示意图

波导之间的开孔为 8 条均匀分布的矩形耦合狭缝, 在同轴腔激励的 TE₈₁₁ 模式, 通过 8 个狭缝以磁耦合的方式在圆波导内建立起 TE₀₂ 模式。其中耦合缝长度和宽度对传输性能的影响尚未有理论证明, 但可以用 HFSS 模拟得到。

输入耦合器结构复杂, 精确的解析分析十分困难。本文采用了输入耦合器的一种近似的理论分析方法进行了研究, 利用 HFSS 进行精确的数值模拟和优化, 得到 W 波段 TE₀₂ 模式高性能的回旋行波管输入耦合器。文献 [9] 中给出了同轴谐振腔的详细分析, 其利用圆柱坐标系, 再通过分离变量法, 得到 TE 波本征方程为

$$J'_m(K_c r_a) Y'_m(K_c r_b) - J'_m(K_c r_b) Y'_m(K_c r_a) = 0 \tag{1}$$

式中: J_m, Y_m 分别为 m 阶第一类 Bessel 函数和 m 阶第二类 Bessel 函数。此时, 为了方便计算并确定内外半径之间的关系, 设 $K_c r_a = \chi, r_b/r_a = \alpha$, 则式 (1) 本征方程变为

$$J'_m(\chi) Y'_m(\alpha\chi) - J'_m(\alpha\chi) Y'_m(\chi) = 0 \tag{2}$$

此时传播常数与谐振条件为

$$\beta_{mn} = \sqrt{K^2 - K_c^2} = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu - (\chi_{mn}/r_a)^2} \tag{3}$$

$$\beta_{mn} L = p\pi \quad (p = 1, 2, 3, \dots) \tag{4}$$

式中: χ_{mn} 为本征方程特征根, 对应于 TM_{mn} 或 TE_{mn} 模式; L 为同轴腔长度。

由于本征方程 (2) 只能用近似求解或数值求解, 利用 Matlab 进行编程计算, 得到同轴波导 TE 模特征根 χ_{mn} 与内外半径之比 α 的关系图如图 2 所示。

截止频率为 $f_c = \chi_{mn}/2\pi r_a \sqrt{\epsilon\mu}$, 因此在半径之比 α 确定时截止频率随外半径增大而减小。文献 [10] 中指出当内外半径之比 α 在 1~2.5 时, TE₆₁, TE₇₁ 的 χ_{mn} 值小于 TE₈₁, 此时通过合适的 L 长度可以使得带内只有 TE₈₁₁ 很好的谐振, 并通过开 8 个槽获得了很纯的 TE₀₂₁ 谐振模式, 因此本论文也通过 TE₈₁₁ 模式采用开 8 槽在回旋行波管圆波导建立 TE₀₂ 模式, 内外半径之比取为 1.3。TE₈₁ 模式下谐振腔长度 L 、传播常数 β 与半径 r_b 的关系如图 3 所示, 当确定谐振腔外半径 r_b 的值为 5.5 mm 时, 可以计算出传播常数 β 的值, 此时也可以确定谐振腔长度 L 的初始值, 而谐振频率与半径 r_b 的关系如图 4 所示。

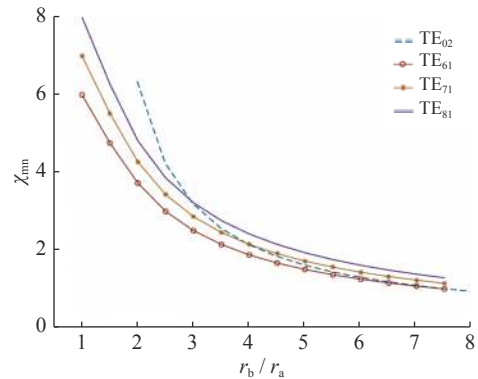


Fig. 2 Eigenvalue of TE mode vs radius ratio
图 2 TE 模特征根与内外半径之比的关系

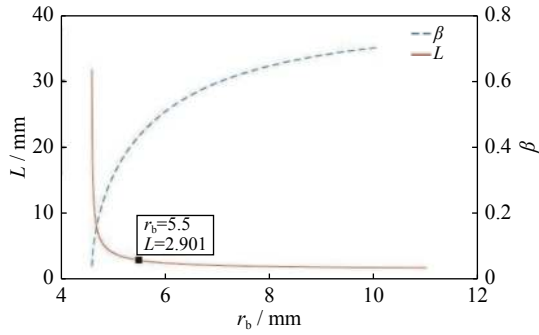


Fig. 3 TE₈₁₁ propagation constant in coaxial guide and length vs radius r_b

图3 同轴腔 TE₈₁₁ 传播常数及谐振腔长度与半径 r_b 的关系

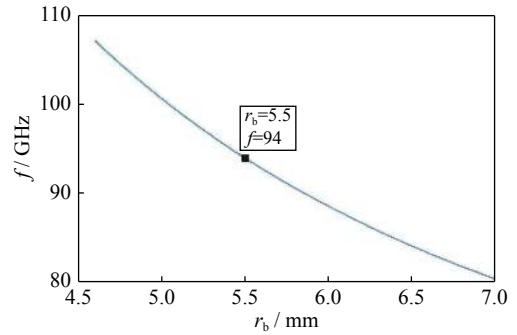


Fig. 4 Frequency vs outer radius r_b

图4 TE₈₁₁ 谐振频率与半径 r_b 的关系

理论分析是求解输入耦合器的关键,可确定耦合器许多结构尺寸的初始范围,在本文中,互作用半径通过计算为 3.65 mm,初始内外腔半径之比取为 1.3,通过谐振腔长度 L 、传播常数 β 与 r_b 的关系就可以得到耦合器初始尺寸如表 1 所示。

表 1 输入耦合器的初始结构
Table 1 Input coupler initial structures

coaxial cavity outer radius	coaxial cavity inner radius	coaxial cavity length	circular waveguide	coupler aperture
5.5	4.23	2.901	3.65	0.6×1.344

2 仿真与分析

在确定部分初始结构参数后,进行模拟得到 TE₀₁ 与 TE₀₂ 模式的传输情况对比如图 5 所示。

可以看到杂模 TE₀₁ 对 TE₀₂ 模式的传输性能有较大影响,而通过改变耦合缝宽边及长边尺寸,由图 6 和图 7 可以看出调整耦合缝的长宽尺寸对 TE₀₁ 模式有明显抑制,因此可以通过调整耦合缝尺寸对 TE₀₂ 模式时的传输性能进行优化。

通过仿真软件 HFSS 进行结构优化,最终优化的输入耦合器结构参数如表 2 所示。此时通过耦合器 3D 模型得到电场分布图如图 8 所示。

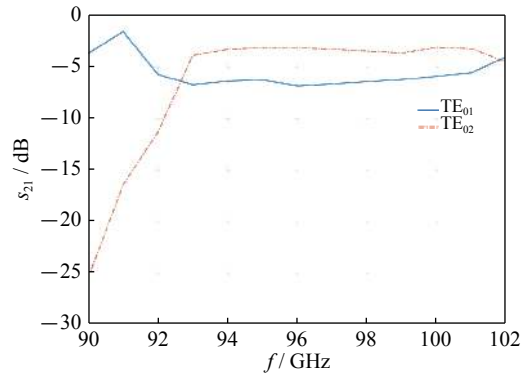


Fig. 5 Coefficient S_{21} of mode TE₀₁ and TE₀₂

图5 TE₀₁ 与 TE₀₂ 模式传输情况

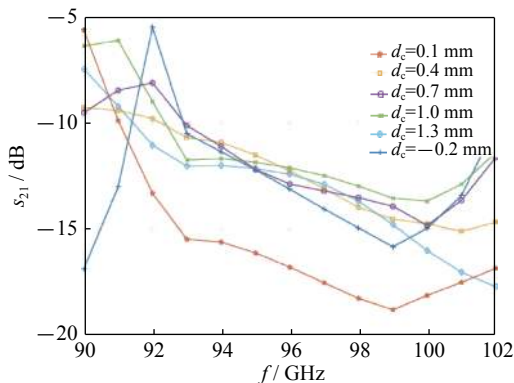


Fig. 6 Dependence of parameter S_{21} of TE₀₁ mode on the length deviation of slot

图6 耦合缝长度偏移对 TE₀₁ 模式 S_{21} 参数的影响

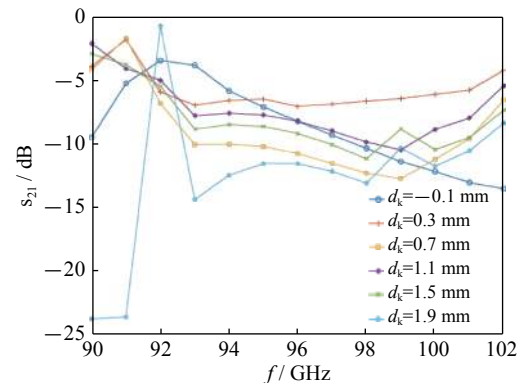


Fig. 7 Dependence of parameter S_{21} of TE₀₁ mode on the width deviation of slot

图7 耦合缝宽度偏移对 TE₀₁ 模式 S_{21} 参数的影响

从图 5 可以看到在圆波导中存在从耦合缝耦合入的 TE₈₁ 模式,但由于 TE₈₁ 模式在波导中是截止的,因此通过 8 个角向相差 45° 的耦合缝最终在圆波导中耦合出较纯的 TE₀₂ 模式。设计出的输入耦合器 S_{21} 参数和 S_{11} 参数如图 9 和图 10 所示。

从耦合系数 S_{21} 的变化曲线可以看到在 3 dB 处频率范围为 92.54~100.54 GHz,共 8 GHz 的带宽。但是由能量

表 2 输入耦合器的优化结构
Table 2 Input coupler optimization structures

coaxial cavity outer radius	coaxial cavity inner radius	coaxial cavity length	circular waveguide	coupler aperture
5.47	4.45	2.92	3.65	0.67×1.35

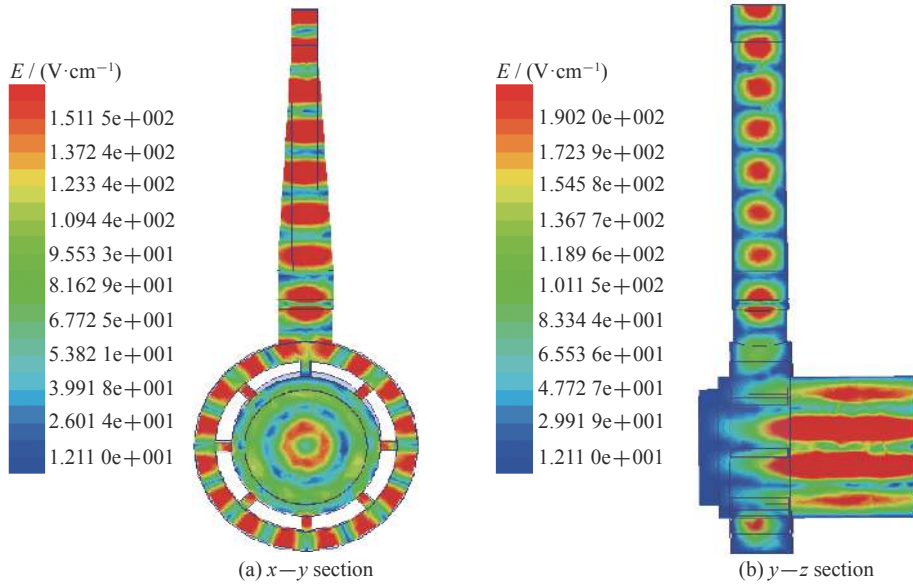


Fig. 8 Electric field profiles of input coupler in HFSS
图 8 HFSS 中输入耦合器的电场分布图

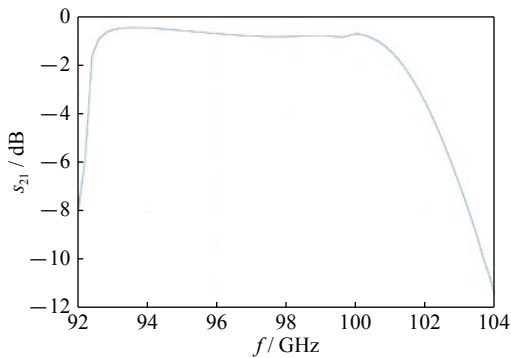


Fig. 9 Coefficient S_{21} of input coupler
图 9 耦合器 S_{21} 系数

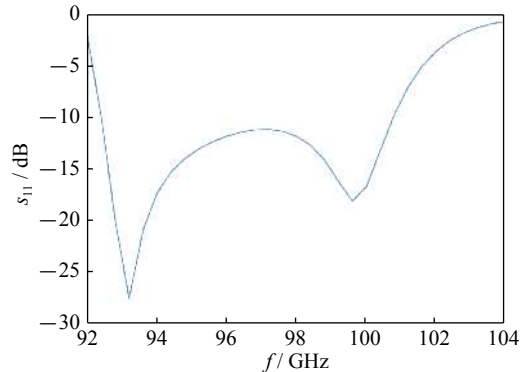


Fig. 10 Coefficient S_{11} of input coupler
图 10 耦合器 S_{11} 系数

守恒公式,在理想条件下应有 $S_{11}^2 + S_{21}^2 = 1$,可以看到能量并不平衡。例如在带外 92 GHz 处 $S_{11}^2 + S_{21}^2 = 0.720 8$,可能是由于杂模存在而引起的。在相同条件下,通过仿真尽可能多 TE₀₂ 模式外的其他模式进行对比,如图 11 所示。同样在带外 92 GHz 处,有两个能量明显较高的杂模,将其计算进去,可得此时 $S_{11}^2 + S_{21}^2 = 0.974 6$,意味着能量在带外传输给到了别的模式,因此杂模也是影响回旋行波管耦合器性能的重要因素之一,之后如果想继续增加带宽则仍需要设法抑制杂模。

3 冷测实验

利用优化设计的尺寸,加工出输入耦合器的实物并进行冷测。图 12 为正在进行冷测的试验照片,图 13 为冷测实验结果与模拟仿真结果的 S_{21} 对比图,实际测试的输入耦合器传输损耗比模拟仿真的传输损耗要大,此外冷测结果在 3 dB 处带宽约为 7.9 GHz,而仿真结果 3 dB 带宽为 8 GHz,是因为模拟仿真模型均为理想情况,而实际加工时,存在加工和装配误差。

4 结 论

本文对 W 波段 TE₀₂ 模式回旋行波管输入耦合器进行理论与数值分析,给出了在 W 波段 TE₀₂ 模式下耦合器各

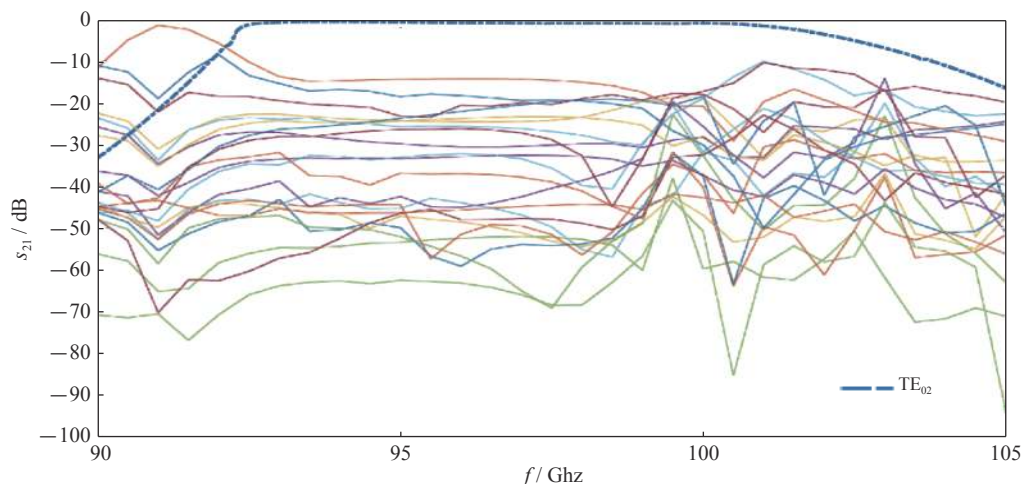
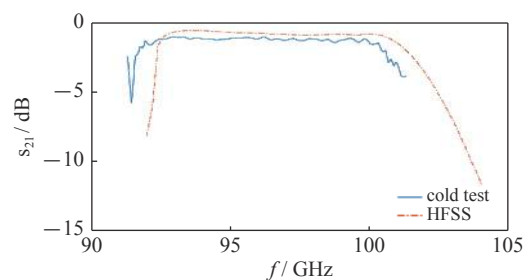
Fig. 11 Dependence of the input coupler's parameter S_{21} on the miscellaneous modes图 11 杂模对输入耦合器 S_{21} 参数的影响

Fig. 12 Cold test of input coupler

图 12 输入耦合器冷测实验图

Fig. 13 Comparison of parameter S_{21} between HFSS simulation and cold test图 13 HFSS 仿真和冷测实验的 S_{21} 参数对比

参数之间的关系。在选择初始参数后模拟发现,杂模 TE₀₁ 对 TE₀₂ 模式耦合器传输损耗影响最严重,而通过调整耦合狭缝对杂模 TE₀₁ 有明显抑制。进行优化后得到模拟设计结果传输损耗为 0.8 dB,但此时在带外利用能量守恒公式计算发现能量并不平衡,通过仿真更多的模式发现其他模式的崛起会影响主模能量的传输。根据优化尺寸加工后实际冷测损耗为 1.0 dB, 3.0 dB 带宽约为 7.9 GHz, 与模拟设计符合较好。

参考文献:

- [1] Granatstein V L, Parker R K, Armstrong C M. Vacuum electronics at the dawn of the twenty-first century[J]. *Proceeding of the IEEE*, 1999, 87(5): 702-710.
- [2] Chu K R. The electron cyclotron maser[J]. *Rev Mod Phys*, 2004, 76(2): 489-540.
- [3] Chu K R. Overview of research on the gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2002, 30(3): 903-908.
- [4] 王丽, 鄢然, 蒲友雷, 等. 高功率毫米波回旋器件的需求及发展[J]. *真空电子技术*, 2010(2): 21-26. (Wang Li, Yan Ran, Pu Youlei, et al. Requirement and development of high power millimeter-wave gyrotron device. *Vacuum Electronics*, 2010(2): 21-26)
- [5] Wang Q S, Huey H E, McDermott D B, et al. Design of a W-band second-harmonic TE₀₂ gyro-TWT amplifier[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1996, 24(3): 613-619.
- [6] 王峨峰. 螺旋波纹波导回旋行波管输入输出耦合器、介质加载回旋行波管研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009. (Wang Efung. The characteristics of input and output coupled structures of gyro-TWT with the helical wave guide and the structure with distributed wall losses of gyro-TWT. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009)
- [7] Garven M, Manheimer W M, Blank M. Simple theory of input couplers for gyrokystron amplifiers[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1998, 26(3): 433-443.
- [8] 罗勇, 李宏福, 赵青, 等. 回旋速调管放大器输入谐振腔分析及数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(3): 358-362. (Luo Yong, Li Hongfu, Zhao Qing, et al. Analysis and simulation of input cavity of gyrokystron amplifier. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(3): 358-362)
- [9] 徐勇, 熊彩东, 罗勇, 等. Ka波段TE₀₁模回旋行波管带宽输入耦合器的设计[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(3): 208-213. (Xu Yong, Xiong Caidong, Luo Yong, et al. Design of broad-band input coupler of Ka-band TE₀₁ mode gyro-TWT. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(3): 208-213)
- [10] 徐寿喜, 刘濮鲲, 张世昌. Ka波段二次谐波回旋速调管放大器输入耦合器的分析与模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(4): 477-480. (Xu Shouxi, Liu Pukun, Zhang Shichang. Analysis and simulation of an input coupler for a Ka-band second harmonic gyrokystron amplifier. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(4): 477-480)
- [11] 王建勋. Ka波段回旋放大器及W波段带状束电子光学系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010. (Wang Jianxun. The research of Ka-band high power millimeter wave. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010)