

Q波段圆波导轴线弯曲 TE_{01} - TE_{11} 模式变换器设计

张贺, 罗勇, 徐勇

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:在模式耦合理论的基础上,采用相位重匹配技术对圆波导轴线弯曲 TE_{01} - TE_{11} 模式变换器进行了数值优化计算和分析.在Q波段给出了两种不同周期数 TE_{01} - TE_{11} 模式变换器的优化设计参数.数值计算表明:四周期模式变换器的最高转换效率为98.82%,带宽为2.2 GHz,六周期最高转换效率为99.89%,带宽为1.7 GHz.研究了模式变换器关键几何尺寸在小范围内变化对转换效率的影响.并利用HFSS对给出的模式变换器进行了仿真,仿真结果与数值模拟一致性较好.同时加工了六周期结构模式变换器并进行了小功率热测实验,测试结果表明输出了模式纯度较高的 TE_{11} 模式.

关键词:回旋行波管;Q波段;耦合波理论; TE_{01} - TE_{11} 模式变换

中图分类号:TN811;TN814;TN128 **文献标识码:**A

Q-band TE_{01} - TE_{11} high power microwave mode converter

ZHANG He, LUO Yong, XU Yong

(University of Electronic Science and Technology of China, School of Physical Electronics, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on the coupling wave theory and phase re-matching technique, a Q-band TE_{01} - TE_{11} circular waveguide mode converter for transmitting high power microwave has been designed and analyzed by numerical calculation and simulation. Results of 4-period and 6-period mode converter are demonstrated in this paper. The numerical calculation show that maximum conversion efficiency is 98.82% and bandwidth is over 2.2GHz for 4-period structure. However, for the 6-period one, the maximum conversion efficiency is 99.89% and bandwidth is over 1.7GHz. It also presented the influence of the key parameters on the conversion efficiency. Simulated results from HFSS agreed well with the numerical calculation. Based on the theory and simulated results, a mode converter was fabricated and tested. It turned out that a pure TE_{11} mode was obtained.

Key words: Gyro-TWT; Q-band; Coupling wave theory; TE_{01} - TE_{11} Mode converter

PACS: 84.40.1k, 52.50.-b

引言

回旋放大器作为一种高功率的毫米波波源,在毫米波雷达、毫米波通信、等离子体加热、材料处理等领域有着十分重要的应用前景,因此在国际上备受重视^[1-4].当前,回旋放大器的工作模式一般采用圆波导的 TE_{01} 模或 TE_{02} 模,属于对称的非线性极化模式,其轴向辐射呈不理想的空心圆锥状不便于长距离传输和直接使用^[5],需要进行模式变换,特别是高功率的模式变换.考虑采用 TE_{0n} - TE_{01} - TE_{11} -

HE_{11} 的变换序列,用 TE_{11} 模作为中介极化模,然后再转换为 HE_{11} 模向外辐射.采用这一模式变换序列是由于波导半径或者轴线都是微小的周期性扰动,几何结构不存在大的弯曲,故只要绕轴线旋转 TE_{01} - TE_{11} 模式变换段就可以简单、迅速地得实现极化方向的改变^[6].而 TE_{01} - TE_{11} 的变换是这一变换序列的关键,所以设计紧凑、高效的 TE_{01} - TE_{11} 圆波导转换器非常重要. Manfred Thumm^[7] 给出了一种中心频率为 70 GHz、转换效率为 97.4% 的轴线弯曲模式变换器.电子科技大学高能所^[8] 设计的模式变换器中

收稿日期:2012-08-20,修回日期:2012-09-13

基金项目:国家高技术发展计划(2011AA8034035)

Foundation items: The national high technology research and development program(2011AA8034035)

作者简介 (Biography): 张贺(1986-),女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究领域为高功率微波毫米波技术的研究. E-mail: zhanghe8111@126.com

Received date: 2012-08-20, revised date: 2012-09-13

心频率为 35 GHz、转换效率为 98%。目前,国内对于 Q 波段轴线弯曲 TE₀₁-TE₁₁ 模式变换器设计鲜有相关报导. 本文对 Q 波段轴线弯曲 TE₀₁-TE₁₁ 模式变换器进行了研究和设计.

利用模式耦合理论和相位重匹配技术,通过数值计算,对轴线弯曲圆波导 TE₀₁-TE₁₁ 模式变换器的几何结构以及尺寸进行了优化分析. 由于高功率模式变换器的电尺寸较大,必须考虑多个模式相互之间的耦合,与此同时本文在分析的过程中还对反向波的耦合进行了考虑. 考虑到工作需求以及 Q 波段具有频率高、加工精度要求高的特点,本文考虑了在加工的过程中会存在的误差,分析了结构参数误差对转换效率的影响. 最后,利用 HFSS 三维仿真软件对结果进行了验证. 数值计算与仿真模拟的吻合较好. 最终,本文给出了两种不同长度的模式变换器,长度为 0.232 m 的模式变换器的最高转换效率为 98.82%,带宽为 2.2 GHz(本文中带宽定义为模式转换效率 90% 以上的频带宽度),长度为 0.34962 m 的模式变换器的最高转换效率为 99.89%,带宽为 1.7 GHz.

1 模式变换的原理与设计方

波导的不均匀性(如圆波导波导半径的渐变、轴线的弯曲等)会引起波导中各传播模式间的耦合,从而产生模式之间的变换. 波导中各传播模式之间的相互耦合可用耦合波方程来描述^[9]:

$$\frac{dA_{m'n'}^+}{dz} = -\gamma_{m'n'} A_{m'n'}^+ - j \sum [C_{(m'n')(mn)}^+ A_{mn}^+ + C_{(m'n')(mn)}^- A_{mn}^-] \quad (1)$$

$$\frac{dA_{m'n'}^-}{dz} = \gamma_{m'n'} A_{m'n'}^- + j \sum [C_{(m'n')(mn)}^+ A_{mn}^- + C_{(m'n')(mn)}^- A_{mn}^+] \quad (2)$$

式中 A_{mn}^+ 与 A_{mn}^- 分别表示正向与反向传播的 (mn) 模的幅值, $C_{(m'n')(mn)}^+$ 与 $C_{(m'n')(mn)}^-$ 分别表示 (mn) 模与同向及反向 $(m'n')$ 模的耦合系数; $\gamma_{mn} = \alpha_{mn} + j\beta_{mn}$ 为 (mn) 模的传播常数,其中 α_{mn} 为衰减常数, β_{mn} 为相位常数,且均为 z 的函数.

式(1)、(2)中,对应的耦合系数公式^[10]为:

1) TE_{0n} 和 $TE_{1n'}$ 之间的耦合系数:

$$C_{(1n')(0n)}^\pm = \frac{X_{0n} X_{1n'}^2 (R_{0n} \pm R_{1n'})^2}{(2R_{0n} R_{1n'})^{1/2} (X_{1n'}^2 - X_{0n}^2)^2 (X_{1n'}^2 - 1)^{1/2}} \times \frac{kr}{R} (-1)^{n+n'+1} \quad (3)$$

2) TE_{mn} 和 $TE_{m'n'}$ 之间的耦合系数:

$$C_{(m'n')(mn)}^\pm = \frac{(-1)^{n+n'}}{2(R_{mn} R_{m'n'})^{1/2} (X_{mn}^2 - m^2)^{1/2} [X_{m'n'}^2 - (m+1)^2]^{1/2} (X_{m'n'}^2 - X_{mn}^2)^2} \times \{ (1 \pm R_{mn} R_{m'n'}) [2X_{mn}^2 X_{m'n'}^2 - m(m+1)(X_{m'n'}^2 + X_{mn}^2)] - \frac{X_{mn}^2 X_{m'n'}^2}{(kr)^2} [X_{m'n'}^2 + X_{mn}^2 - 2m(m+1)] \} \times \frac{kr}{R} \quad (4)$$

式中 X_{mn} 为 TE_{mn} 模的特征方程 $J'_m(X)$ 的第 n 个非零根, $R_{mn} = \beta_{mn}/k$ 为归一化的传播常数, r 和 R 分别为结构的轮廓和曲率半径分布, k 为自由空间波长. 相位常数 $\beta^2 = k^2 - (X/r)^2$.

为了抑制其他耦合模式的幅值,提高转换效率,在圆波导轴线弯曲微扰耦合结构的基础上,应用相位重匹配技术得到由下式的描述的 TE₀₁-TE₁₁ 轴线弯曲波导结构^[11]:

$$r(z) = r_0 [\varepsilon_1 \cos(\Delta\beta(01,11)z) - \varepsilon_2 \sin(\Delta\beta(01,12)z) - \varepsilon_3 \sin(\Delta\beta(11,21)z)] \quad (5)$$

$r(z)$ 为波导轴线偏离原轴线的数值,其中, r_0 为波导半径, ε 为微扰幅度, $\Delta\beta(01,11)$ 、 $\Delta\beta(01,12)$ 、 $\Delta\beta(11,21)$ 分别为 TE₀₁ 与 TE₁₁、TE₀₁ 与 TE₁₂、TE₁₁ 与 TE₂₁ 之间相对相位常数,且有:

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\lambda_B \approx \Delta\beta_w = 2\pi/\lambda_w \quad (6)$$

λ_B 为两个互作用模式的拍波波长, $\lambda_w = (1 + \delta)\lambda_B$ 为优化后的扰动周期,变换器的总长度 $L = N\lambda_w$,其中 N 即为后文中提到的周期. 本文即是利用以上耦合结构和相位重匹配技术,通过对式中结构参数 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 δ_{11} 、 δ_{12} 和 δ_{21} (其中 δ_{11} 、 δ_{12} 、 δ_{21} 分别为 TE₀₁ 与 TE₁₁、TE₀₁ 与 TE₁₂、TE₁₁ 与 TE₂₁ 之间的相位重匹配因子)进行数值优化,从而实现 TE₀₁-TE₁₁ 高效率转换.

2 数值计算与仿真结果

在以上理论分析的基础上,编制了 Q 波段半径为 8 mm 的轴线弯曲模式变换器(结构如图 1 所示)的优化设计程序,并进行了大量的数值计算,表 1 给出了中心频率为 43 GHz 的 TE₀₁-TE₁₁ 模式变换器的优化参数和结果,表中 P_{sum} 表示为各模式的总功率.

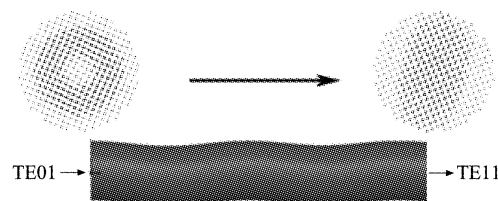


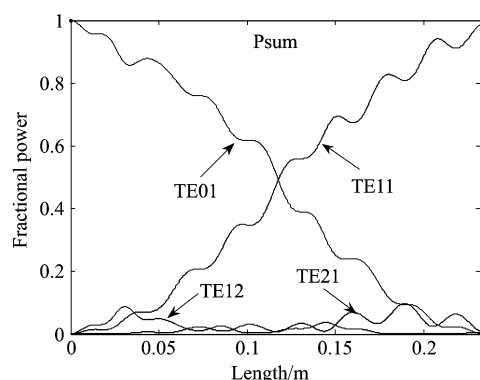
图 1 轴线弯曲模式变换器的结构示意图
Fig. 1 Schematic of snake-bend mode converter

由表 1 可以看出,四周期模式变换器最大转换效率为 98.82%,六周期模式变换器最大转换效率为 99.89%。要提高转换效率需增加周期数目,但增加周期数目会使模式变换器的长度变长。

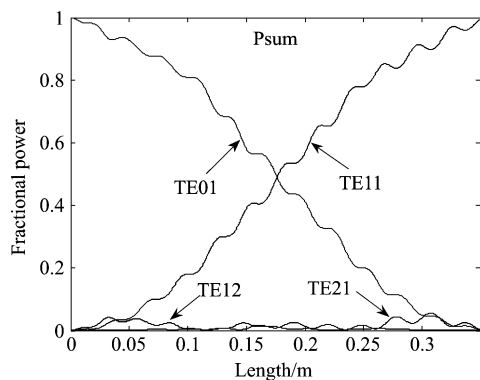
表 1 $TE_{01} - TE_{11}$ 式变换器的优化结果
Table 1 Simulation results of $TE_{01} - TE_{11}$ mode converter

Parameter	N	4	6
Radius(mm)		8	8
ϵ_1		0.1226	0.080894
ϵ_2		-0.00071	0.000659
ϵ_3		0.01214	0.0112379
δ_{11}		-0.003	0.001828
δ_{12}		-0.0083	0.0305599
δ_{21}		-0.0273	0.0015566
P_{sum}		0.999996	0.999995
Fractional power	TE_{01}	1.3049×10^{-3}	2.1819×10^{-4}
	TE_{11}	0.9882	0.9989
	TE_{12}	0.0026	6.0440×10^{-6}
	TE_{21}	0.0079	8.5734×10^{-4}
Efficiency		98.82%	99.89%
Converter length(m)		0.232	0.34962

图 2 (a) 和 2(b) 分别为优化后的四周期和六周



(a)



(b)

图 2 (a) 四周期相对功率沿轴线的分布, (b) 六周期相对功率沿轴线的分布

Fig. 2 Fractional power along axis in (a) 4-period, and (b) 6-period

期模式变换器中各模式相对功率沿轴线的分布. 可看出, TE_{01} 模式都高效率的转化为了 TE_{11} 模式, 且由于采用了相位重匹配技术, 输出端的杂模功率已经很小。

图 3 为优化后四周期和六周期模式变换器输出端口处 TE_{11} 模式相对功率随频率的变化. 可得四周期模式变换器带宽约为 2.2 GHz (5.12%), 六周期的模式变换器带宽约为 1.7 GHz (3.95%). 增加周期数可以提高最大转换效率, 但带宽变小. 这是由于, 当周期数目小时, 要实现较高的转换效率, 模式变换器的结构变化必然剧烈, 此时耦合出的杂模相应就大一些. 带宽变小是因为本文采用了相位重匹配技术, 模式变换器周期数增加后, 满足相位重匹配的频率点相应的减少, 所以带宽变小. 但是模式变换器的长度变长会不利于实际应用, 故在实际中需要根据工作需求来确定模式变换器的选择。

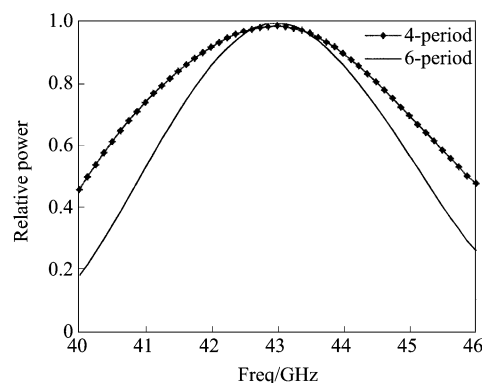


图 3 四周期和六周期相对功率与频率的关系
Fig. 3 Fractional power versus frequency in 4-period and 6-period

考虑到器件在加工的过程中会存在误差, 我们对周期数目为 4 的模式变换器的结构参数 ϵ_1 、总长度 L 、半径 r 进行了分析研究, 得到的结果如图 4 所示:

由图 4(a)、4(b) 可以看出, 模式变换器的结构参数 ϵ_1 和总长度 L 的变化对转换效率基本没有影响, 当 ϵ_1 变化 $\pm 2\%$ 时, 相对误差少于 0.208%; 当总长度 L 变化 $\pm 2\%$ 时, 相对误差小于 0.17%; 由图 4(c) 可以看出, 模式变换器半径的变化对转换效率影响不大, 经计算可得当半径 ϵ_1 变化 $\pm 0.2\%$ 时, 相对误差不大于 0.2%. 半径的变化会引起拍波波长的变化使得转换效率变化比较大, 故在加工时要保证半径的误差尽量小。

为了验证编程计算结果的正确性, 本文将所得

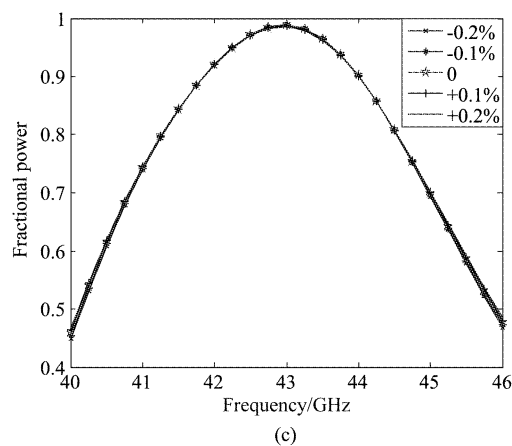
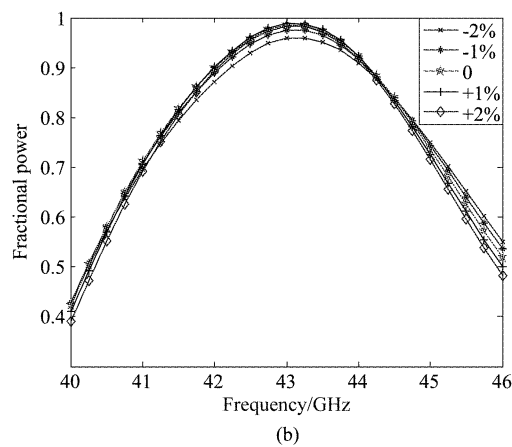
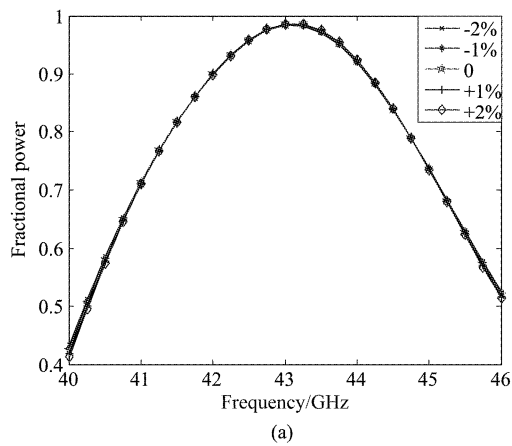


图4 (a) 四周期不同结构参数下转化效率与频率的关系, (b) 四周期不同长度下转化效率与频率的关系, (c) 四周期不同半径下转化效率与频率关系
Fig. 4 Fractional power versus frequency in 4-period mode converter (a) in different, (b) in different length, and (c) in different radius

模式变换器的结构在 HFSS 中进行了仿真验证, 结果如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可以看出, 输入端口的模式为标准的 TE₀₁ 模式, 在输出端口得到了很好的 TE₁₁ 模式。

图 6(a) 和 6(b) 分别为四周期和六周期数值计算与 HFSS 仿真得到的最大效率与频率的关系。由

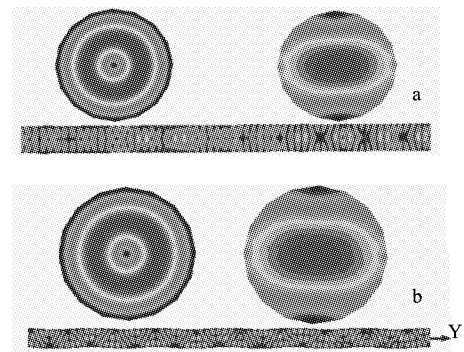


图5 四周期(a)以及六周期(b)模式变换器输入端口、输出端口和纵切面处的电场分布样式
Fig. 5 E-field plot of mode converter at the input and output profile for (a) 4-period and (b) 6-period

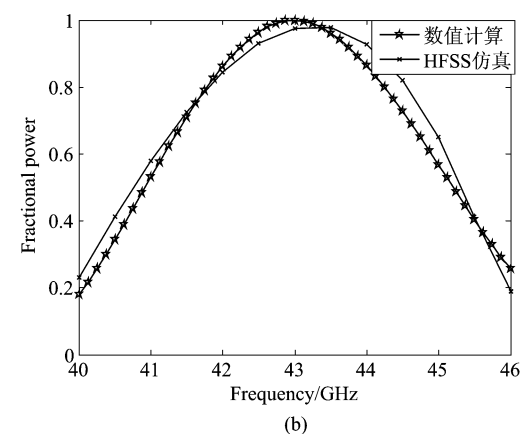
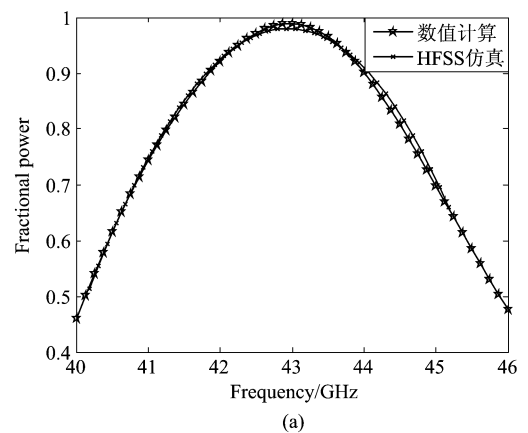


图6 (a)四周期两种计算方法的比较, (b) 六周期两种计算方法的比较
Fig. 6 Comparison between numerical calculations and simulation (a) in 4-period, and (b) in 6-period

图 6 可以看出仿真结果与计算一致性很好。

3 热测实验

根据上述设计结果, 加工了六周期圆波导轴线弯曲模式变换器, 并进行了热测实验。加工器件的轴线方程为 $6.4715 \times 10^{-4} \cos(107.83z) - 5.272 \times 10^{-6} \sin$

(152.26z)-8.990 × 10⁻⁶ sin(54.937z), 长度为 349.62 mm, 内半径 8 mm, 外半径 12 mm. 实验测试采用安捷伦 8257D 信号源, 通过 Q 波段扩频单元输出, 再经过 10 W 固态功放的放大后, 通过矩形波导, 然后通过 TE₁₀[□]-TE₀₁[○] 模式变换器后的输出模式作为 TE₀₁[○]-TE₁₁[○] 模式变换器的输入模式, 输出模式最终反映在热敏纸上. 实验时将热敏纸放在模式变换器的输出端口, 由于不同模式不同位置的能量分布不同, 产生的热效应也不同, 使得热敏纸上不同位置产生不同的颜色, 从而显现出模式形态. 相应的热测实验原理如图 7 所示, 搭建的实验平台及 TE₀₁[○]-TE₁₁[○] 模式变换器在 43 GHz 时输入输出能量在热敏纸上形成的模式图, 如图 8 所示. 图 9 给出了频率分别为 42.5 GHz、43 GHz 以及 43.5 GHz 时对应的输出模式图. 测试结果表明, 在 10 W 固态源的驱动下, 在模式变换器输出端口得到了较好的 TE₁₁ 模式.

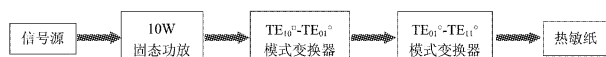


图 7 热测实验原理框图
Fig. 7 Schematic of hot test principle

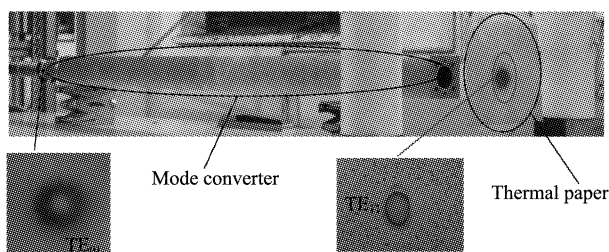


图 8 模式变换器输出模式图
Fig. 8 Mode pattern of converter

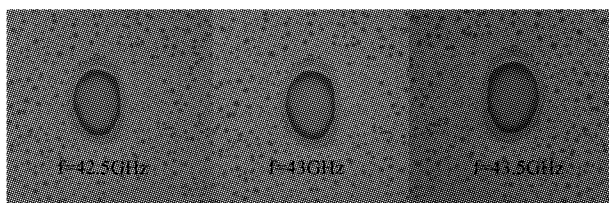


图 9 频率分别为 42.5 GHz、43 GHz、43.5 GHz 时对应的输出模式图
Fig. 9 Output mode patterns of 42.5 GHz, 43 GHz, and 43.5 GHz

4 结论

利用数值计算和 HFSS 结合的方法进行了 Q 波段轴线弯曲 TE₀₁-TE₁₁ 模式变换器的设计. 通过数值

计算, 四周期模式变换器的最高转换效率达到 98.82%, 带宽约为 5.12%, 六周期模式变换器的最高转换效率达到 99.89%, 带宽约为 3.95%. 通过误差分析, 得出了结构参数以及长度的变化对转换效率基本没有影响, 半径的变化对转换效率影响相对较大, 故在加工的过程中, 必须尽量减小模式变换器半径的误差. 同时对六周期模式变换器进行了热测实验, 获得了具有较高模式纯度的 TE₁₁ 模式, 该研究可为回旋管外接模式变换器的设计提供技术支持.

REFERENCES

- [1] WANG Li, YAN Ran, PU You-Lei, LUO Yong. Requirement and development of high power millimeter-wave gyrotron device, [J] *Vacuum Electronics* (王丽, 鄢然, 蒲友雷, 罗勇. 高功率毫米波回旋器件的需求及发展. *真空电子技术*), 2010-02 毫米波器件技术专题: 21-26.
- [2] LIU Sheng-gang, *Development of ECM and Gyrotron* [M], Chengdu: Sichuan Education Press (刘盛纲. *电子回旋脉塞和回旋管的进展*. 成都: 四川教育出版社), 1988, 1-16.
- [3] DING Yao-Gen, PENG Jun. Multibeam Klystron—a new type of high power microwave amplifier, [J]. *Journal of Electronics* (丁耀根, 彭钧. 多注速调管—一种新型大功率微波放大器. *电子科学学刊*), 1996, 18(1): 64-71.
- [4] LUO Yong, LI Hong-Fu. Requirement and development of HPM, [J] *Vacuum Electronics* (罗勇, 李宏福. 高功率微波的需求及发展. *真空电子技术*. 2004, 专题论坛(1): 4-7.
- [5] PENG We, LIU Pu-kun, GENG, Zhi-Hui. Design and Analysis of 94GHz TE₀₂-TE₁₁ Mode Converter Sequence [J], *Vacuum Electronics* (彭伟, 刘濮鲲, 耿志辉. 94GHz TE₀₂-TE₁₁ 模式变换链的设计与模拟. *真空电子技术*), 2010, (5), 4-8.
- [6] THUMM M. High-power millimeter mode converters in overmoded circular waveguides using periodic wall perturbations. [J] *INT. J. Electronics*, 1984. 57(6): 1225-1246.
- [7] THUMM, M. (1986). "High power mode conversion for linearly polarized HE₁₁ hybrid mode output." *INT. J. Electronics* 61(6): 1135-1153.
- [8] NIU Xin-Jian, YU Sheng, LI Hong-Fu, DENG Xue, et al. Design mode coupling for overmoded bent circular waveguide [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牛新建, 喻胜, 李宏福, 邓学, 等. 过模弯曲圆波导模式耦合设计. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 67-70.
- [9] LI Hong-Fu, M. T. (1991). "Mode conversion due to curvature in corrugated waveguides." *INT. J. Electronics* 71(2): 333-347.
- [10] LI Hong-Fu, THUMM M. Study on mode coupling coefficients in curved corrugated circular waveguides [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李宏福, THUMM M. 弯曲波纹波导中模式耦合系数的研究. *红外与毫米波学报*), 1992, 11(6): 486-491.
- [11] HUANG Hong-Jia, *Theory of microwave* [M], Beijing: Science Press (黄宏嘉. *微波原理*. 北京: 科学出版社), 1965, 264-270.