

## 一种同轴波导 $TE_{01}$ 模到圆波导 $TE_{02}$ 模变换器的数值模拟

栾远涛<sup>①②</sup> 罗积润<sup>①</sup> 朱敏<sup>①②</sup> 袁广江<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文对一种同轴波导  $TE_{01}^{\circ}$  模到圆波导  $TE_{02}^{\circ}$  模变换器进行数值模拟研究。通过分析同轴波导与圆波导对接产生的模式转换效果, 探讨尖劈模式变换段改善工作模式转换系数和工作频带以及抑制寄生模式的作用。利用 Ansoft HFSS 对模型进行的数值模拟计算结果表明, 这种结构能够实现最大将 89.3% 输入信号能量转换到  $TE_{02}^{\circ}$  模, -3dB 带宽约 820MHz, 带内对主要干扰模式  $TE_{01}^{\circ}$  的抑制在 10dB 以上。

**关键词:** 回旋管; 模式变换; 转换系数; 杂模抑制; 数值模拟

中图分类号: TN128

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2521-04

## Numerical Simulation of a Mode Converter from the Coaxial Waveguide $TE_{01}$ Mode to the Circular Waveguide $TE_{02}$ Mode

Luan Yuan-tao<sup>①②</sup> Luo Ji-run<sup>①</sup> Zhu Min<sup>①②</sup> Yuan Guang-jiang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Numerical simulation of mode conversion from the coaxial waveguide  $TE_{01}^{\circ}$  mode to the circular waveguide  $TE_{02}^{\circ}$  mode is studied. The mode conversion of directly connecting a coaxial waveguide to a cylindrical guide is analyzed, and the effect of a sector-slotted structure in the cylindrical guide for mode conversion is discussed for improving the conversion coefficient, bandwidth property and mode suppression for competing mode. The numerical simulation results with Ansoft HFSS show that 89.3% of the energy from input  $TE_{01}^{\circ}$  mode can be converted to the  $TE_{02}^{\circ}$  mode, the -3dB bandwidth is about 820MHz, and the amplitude of the main competition mode, the  $TE_{01}^{\circ}$  mode, is 10dB less than that of the  $TE_{02}^{\circ}$  operating mode.

**Key words:** Gyrotron; Mode conversion; Conversion coefficient; Suppression of competition mode; Numerical simulation

### 1 引言

在回旋管研究中, 由于高次模式的采用, 不同模式之间的变换成为模式的选择和抑制以及电磁波输入输出耦合的重要手段, 并根据模式变换器的应用目的差异派生出许多种类的模式变换器。为了提高工作模式的稳定性, 人们采用纵向或径向开槽结构破坏寄生模式, 增强工作模式的强度; 为了使高功率回旋管输出的高次模式能够在空间有效传播, 人们采用皱纹波导, 将圆波导中  $TE_{0n}$  模转换成线极化的  $TE_{11}$  模<sup>[1,2]</sup>, 或者采用准光学变换, 将高阶  $TE_{mn}$  模转换成线极化高斯波束<sup>[2-4]</sup>; 为了使输入微波信号能够与回旋管放大器中工作模式有效耦合, 人们设计了矩形波导基模  $TE_{10}^{\square}$  到同轴波导  $TE_{m1}^{\circ}$  模到圆波导  $TE_{0n}^{\circ}$  模 ( $TE_{10}^{\square} \rightarrow TE_{m1}^{\circ} \rightarrow TE_{0n}^{\circ}$ ) 变换器<sup>[5-8]</sup>。

无论哪种类型的模式变换器, 抑制杂模成分的强度、提高期待模式的转换系数和扩展工作频带宽度始终是模式变

换器研究的重点内容。本文利用一种同轴波导外半径与圆波导半径相同直接连接后, 再在圆波导中插入一沿径向和轴向渐变开槽尖劈变换段构成  $TE_{01}^{\circ} \rightarrow TE_{02}^{\circ}$  模式变换器。希望通过结合同轴和圆波导之间的宽带匹配以及尖劈开槽的滤波特性, 在实现一定工作频带和杂模抑制条件下, 实现工作模式之间的高效率转换。

### 2 基本模型

图 1(a) 是本文研究的模式变换器模型。图中左边是一段内导体有一供电子束通过通道的同轴波导, 右边圆波导中有一段如图 1(b) 所示的尖劈开槽变换结构。图中  $R_1$  是圆波导半径(同轴波导的外半径),  $R_2$  是同轴波导的内半径,  $R_3$  是电子束通道半径,  $R_4$  是尖劈开槽变换段内孔的半径。 $R_3$  的取值使所有模式在孔中过截止,  $R_1/R_4 = X_{02}/X_{01}$ ,  $X_{01}, X_{02}$  分别为零阶贝塞尔函数导数  $J'_0(X)$  零点的第 1 和第 2 个根。如果  $TE_{01}^{\circ}$  同轴模从左边同轴波导输入, 由于同轴波导内边界的径向突变, 将在圆波导和同轴波导中主要激起正向( $TE_{01}^{\circ}$  和

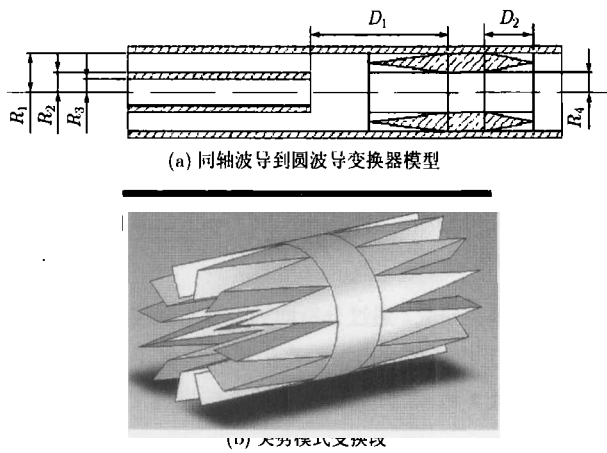


图 1

$TE_{02}^{\circ}$ 和反向( $TE_{01}^{\circ}$ )传输的圆电模式。合理选择尖劈变换段长度和其在圆波导段中的位置以增强  $TE_{02}^{\circ}$  模,削弱  $TE_{01}^{\circ}$  模,在足够带宽的基础上,实现高的模式转换效率。本文基于这种模型,利用 Ansoft HFSS 高频分析计算软件,分析模型中各种几何参数变化对模式转换性能的影响,综合考虑工作模式之间的转换效率、杂模抑制和工程设计要求的工作频带宽度。

3 同轴波导与圆波导对接模式转换分析

在图 1(a)中,如果没有圆波导中的尖劈模式变换段,则模型成为同轴波导与圆波导的对接。两种波导的跳变连接是这种模式变换器的重要组件,它决定从左边输入的同轴  $TE_{01}^{\circ}$  模能够在系统中激起那些模式、每一种模式所占的比例以及工作模式是否占有转换的优势等关键问题。为此本文在 Ku 波段计算分析了工作频率、同轴波导内半径  $R_2$  和电子束通道半径  $R_3$  对这一结构中模式耦合和变换的影响。

图 2 给出了这一结构中不同模式转换系数随频率的变化关系曲线。曲线表明,在频率 18~19.4GHz 范围,圆波导中  $TE_{01}^{\circ}$  和  $TE_{02}^{\circ}$  的转换系数非常相近,都在 -3dB 附近,两者所占能量大于 98%;而  $TE_{01}^{\circ}$  同轴模的反射和所有其它杂模的转换系数均在 -20dB 以下。图 3 给出了这一结构中电场分布图。从图中可以看出,左边同轴波导中是规则的  $TE_{01}^{\circ}$  模式场分布,而右边圆波导内的电场强度主要是  $TE_{01}^{\circ}$  和  $TE_{02}^{\circ}$  两个模式场的叠加,两者之间存在相互耦合现象。

图 4 给出了在这种转换结构中同轴波导的内半径  $R_2$  对模式转换系数的影响。基于前面讨论的结果,图 4 中没有考虑非圆电模式的影响。曲线表明,对工作频带内的 4 个不同频率,  $R_2 = 10.3 \sim 10.7\text{mm}$ ,  $TE_{01}^{\circ}$  和  $TE_{02}^{\circ}$  的转换系数都在 -3dB 附近,两者所占能量也大于 98%;而  $TE_{01}^{\circ}$  同轴模的反射在 -20dB 以下。通常  $R_3$  的取值使所有模式都处于截止状态,计算表明,  $R_3$  的变化对转换系数的影响非常小。这些结果表明,这一结构设计对工程误差的敏感程度较小。

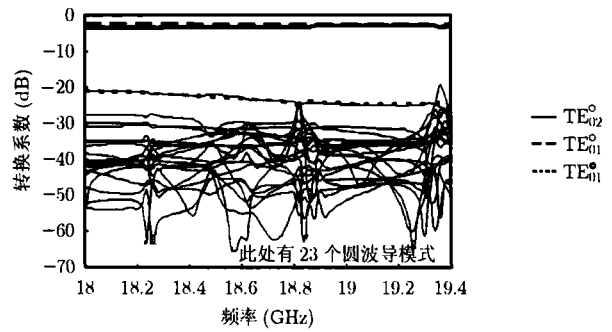


图 2 同轴波导到圆波导转换结构中模式转换系数随频率变化的关系(无尖劈模式变换段)

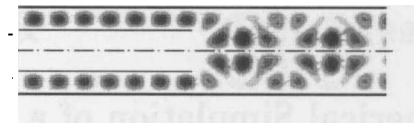


图 3 同轴波导到圆波导转换结构的电磁波电场分量的强度图(无尖劈模式变换段)

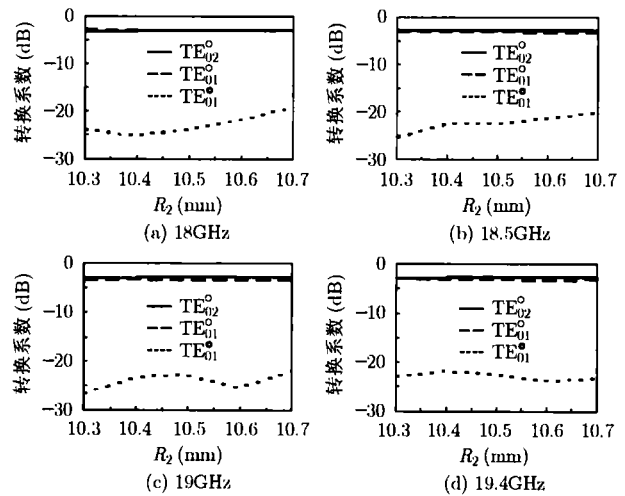


图 4 模式转换系数随同轴波导内半径( $R_2$ )变化曲线

4 尖劈变换段的影响

从前面的分析可知,利用同轴波导与圆波导的对接难以增强  $TE_{02}^{\circ}$  模的转换系数和削弱  $TE_{01}^{\circ}$  模的转换强度。如果在圆波导内插入一段尖劈变换段,尖劈的变化和过渡会影响模式存在的性能。尖劈的左半部分过渡缓慢,用于匹配使  $TE_{01}^{\circ}$  和  $TE_{02}^{\circ}$  尽可能都转换成  $TE_{01}^{\circ}$ ,尖劈的右半部分是将均匀圆波导段传过来的  $TE_{01}^{\circ}$  模尽可能多地转换为  $TE_{02}^{\circ}$  模。不过,左边尖劈部分与同轴波导之间形成了一个谐振系统,这将影响模式转换系数的频带宽度,同时增强同轴波导中的反射。

图 5 给出了加入 8 个尖劈的模式变换段后,对于不同左边尖端起始点到同轴与圆波导跳变处的距离  $D_1$ ,模式转换系数随频率的变化曲线。从图中可以看出,由于尖劈的加入,在计算的频率范围内,出现谐振点,能量被全部反射回去。随着  $D_1$  的增加,谐振点向低频移动,当  $D_1$  的长度选择合适

时,计算的频率范围内出现两个谐振点,亦即模式转换系数具有带通特性。值得注意的是,除谐振点附近外,TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模的转换系数得到了很大的增加。以图 5(c)为例,TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模的能量转换最大达到了 89.3%, -3dB 带宽约 820MHz, TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模的能量转换最大仅 8.3%,另外还有 2.2%的能量从同轴波导反射回去了,其它杂模仅占 0.2%左右;在整个工作频带内,TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模的能量至少比 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模的小 10dB;与图 2 相比,带内的反射由小于 -20dB 上升为 -15dB 以上,同时在 18.0GHz 和 19.1GHz 附近有谐振点,形成了很强的反射。图 6 给出了 D<sub>1</sub>=104mm, 频率 18.7GHz 时模式变换器内电场分布图。与图 3 相比,在整个模式变换过程中,模式之间的重叠和耦合明显减弱,呈现出好的模式纯度,仅仅在模式变换段均匀区两边附近略有一点畸变。在圆波导输出端口是很规则的 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模,零点和最大值之间分界线很明显。计算发现,尖劈变换段左边的长度和个数对模式耦合强度和频带特性的影响并不十分明显。不过,如果没有这些尖劈,则在模式转换的通频带内,容易产生其它杂模而影响通频带特性。尽管通过调整其它参数依然可能消除这些杂模,但这将使通频带特性对这些参数的变化更加敏感,不利于机械加工。

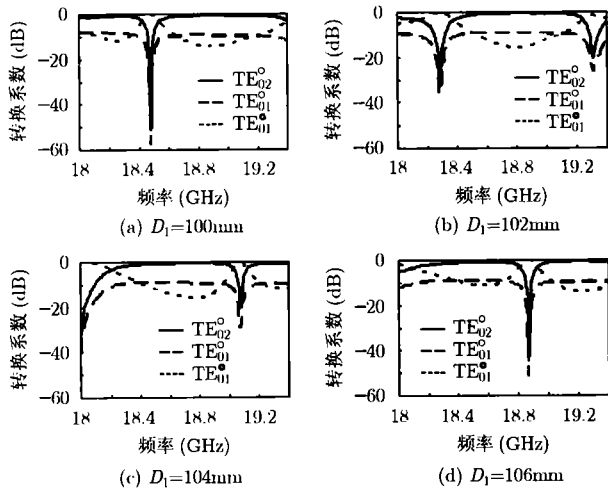


图 5 不同尖劈变换段左端长度,模式转换系数随频率变化曲线

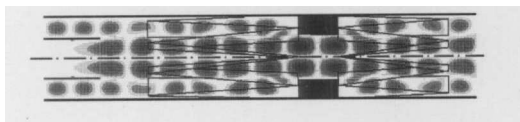


图 6 加入尖劈变换段后变换器中的电场分布图

图 7 给出对于不同工作频率点,尖劈变换段内圆孔半径 R<sub>4</sub> 变化对模式转换系数的影响。曲线表明, R<sub>4</sub> 的变化对模式转换器的最大转换系数影响较小。不过,随着频率的提高,达到高转换系数的 R<sub>4</sub> 取值范围变窄。综合图 7 中 4 组曲线,发现 R<sub>4</sub> 的取值应该在 11.5mm 附近比较合适。

图 8 给出了对不同频率转换系数随尖劈变换段右端长度变化的关系曲线。曲线表明, D<sub>2</sub> 的增长能够增大 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模的转换系数,减小 TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模的转换系数,如果 D<sub>2</sub> 在 60mm 以上,

TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模的转换系数比 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模的小 10dB 以上。频率的提高能够减弱同轴波导中 TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模的反射,增强 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模的转换系数。

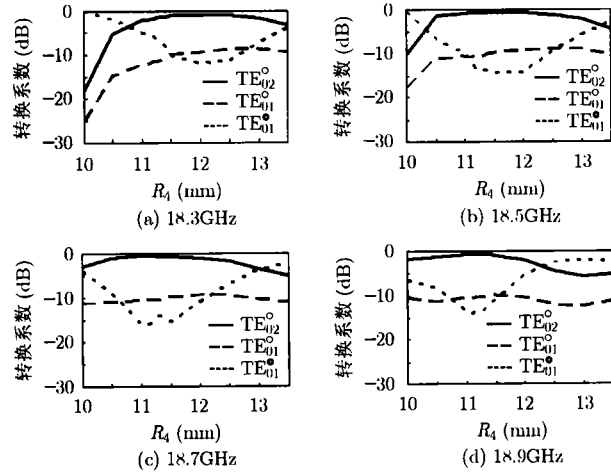


图 7 模式转换系数随尖劈变换段内半径(R<sub>4</sub>)的变化曲线

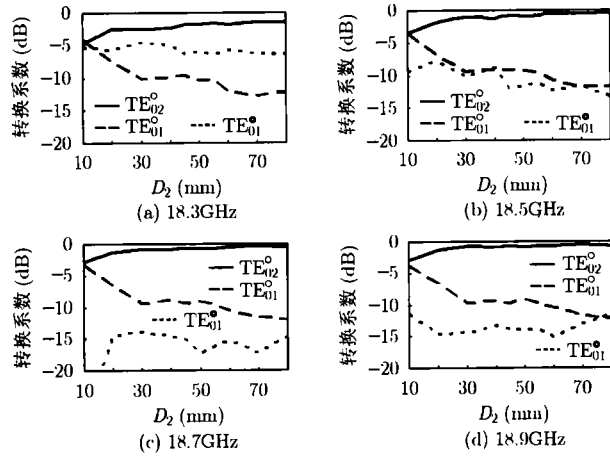


图 8 模式转换系数随尖劈变换段右端长度(D<sub>2</sub>)变化曲线

### 5 结束语

对于本文研究的同轴波导 TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模到圆波导 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模变换器,在同轴波导与圆柱波导对接过程中激起的 TE<sub>01</sub><sup>o</sup>和 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>两个模式的强度非常接近,都在 -3dB 左右,两者包含总能量的 98%以上, TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模的反射和其它杂模的强度均在 -20dB 以下。尖劈模式变换段的加入能够明显增强变换器中的 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模输出强度,抑制 TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模的输出, TE<sub>01</sub><sup>o</sup>模输入信号到 TE<sub>02</sub><sup>o</sup>模输出之间的能量转换最大为 89.3%, -3dB 带宽大于 4%。这一模式变换结构很有工程实用价值。

### 参考文献

- [1] Thumm M. High power millimeter-wave mode converters in overmoded circular waveguides using periodic wall perturbations. *Int. J. Electronics*, 1984, 57(6): 1225-1246.
- [2] Thumm M K and Kasperek W. Passive high-power microwave components. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2002, 30(3): 755-786.

- [3] Drumm O, Dammertz G, and Thumm M. Design methods for mirrors in a quasi-optical mode converter for a frequency step-tunable gyrotron. 27<sup>th</sup> Inter. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, San Diego, USA, 2002: 191-192.
- [4] Blank M, Kreischer K, and Temkin R J. Theoretical and experimental investigation of a quasi-optical mode converter for a 110-GHz Gyrotron. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1996, 24(3): 1058-1066.
- [5] Luo Jirun, Guo Hezhong, and Su Yinong, *et al.* Experiment study of an input coupler for Ka band harmonic multiplying gyro-amplifier. Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC'2001), Taipei, 2001, vol.2: 870-873.
- [6] Luan Yuantao, Luo Jirun, and Su Yinong, *et al.* Numerical simulation of a mode converter from TE<sub>10</sub> rectangular guide mode to TE<sub>01</sub> coaxial guide mode. Proceeding of IVEC2003, Seoul, Korea, 2003: 227-228.
- [7] Zhu Min, Luo Jirun, and Luan Yuantao, *et al.* Input coupler for Ka band TE<sub>021</sub> circular electric mode operation in a gyrokystron amplifier. *Journal of Electronics (China)*, 2003, 20(6): 472-476.
- [8] McCurdy A H and Choi J J. Design and analysis of a coaxial coupler for a 35-GHz gyrokystron amplifier. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(2): 164-175.
- 栾远涛: 男, 1979年生, 博士生, 从事高功率毫米波技术与应用的研究.
- 罗积润: 男, 1957年生, 研究员、博士生导师, 主要从事高功率毫米波技术与应用的研究.
- 朱敏: 女, 1976年生, 助理研究员, 从事回旋管和速调管高频结构的研究.
- 袁广江: 男, 1971年生, 副研究员, 主要从事高功率毫米波技术与应用的研究.