

文章编号: 1001-4322(2002)05-0753-04

# 高功率弯波导 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 模式变换临界角分析\*

牛新建, 李宏福, 喻 胜, 谢仲怜

(电子科技大学 高能电子学研究所, 四川 成都 610054)

摘 要: 在模式耦合理论的基础上, 采用传统的波导轴线圆弧弯曲的方法, 对 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 模式变换器的临界角进行了全面的优化分析。得出在临界角情况下, 若考虑多模因素, 则不能使 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 的能量发生全转换, 而真正的最优化能量全转换角在临界角的附近, 且转换的效率与弯波导曲率相关。

关键词: 圆波导; 弯曲波导; 模式变换; 耦合波方程

中图分类号: TN811; TN814 文献标识码: A

回旋速调管具有高峰值功率、高平均功率、高增益、高效率、适当带宽等优点, 适合作毫米波高性能雷达、相控阵雷达、毫米波通信、受控热核聚变等系统用功率源。然而, 回旋速调管的输出模式一般是 TE<sub>01</sub> 模或 TE<sub>02</sub> 模, 不便直接使用, 需要进行模式变换。作者考虑采用 TE<sub>0n</sub>—TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub>—HE<sub>11</sub><sup>[1,2]</sup> 变换序列, 用 TM<sub>11</sub> 模作为中介极化模, 然后再转换为 HE<sub>11</sub> 模向外辐射, 而 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 的变换是这一变换序列的关键。在 TE<sub>01</sub> 波到 TM<sub>11</sub> 波的模式转换中, 由于 TE<sub>01</sub> 波和 TM<sub>11</sub> 波有相同的相位常数, 它们之间将发生强耦合, 功率转换也最强烈, 因而在模式转换的近似分析中, 可以只考虑 TE<sub>01</sub> 波和 TM<sub>11</sub> 波, 并且恰当地选择一段圆弧形的单弯曲圆波导即可实现 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 的变换。在此近似分析中, 存在功率完全转换的临界角  $\theta_c$ , 可以使 TE<sub>01</sub> 波的功率全部转换到 TM<sub>11</sub> 波, 且发生功率全转换的转角(临界角)  $\theta_c$  和弯波导的半径  $R$  (或曲率  $1/R$ ) 无关<sup>[3]</sup>。对耦合系数的分析可知, 在 TE<sub>01</sub> 波和 TM<sub>11</sub> 波的转换中, 其输入和输出模都会与其它寄生模式发生耦合, 而且有些还是强耦合。在数值模拟的过程中发现, 若考虑多个模式时, 临界角并不能使 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 的能量发生全转换, 而真正的最优化能量全转换角在临界角的附近, 且转换效率与弯波导的曲率或弧长有关, 存在最佳曲率半径。

## 1 模式变换的基本原理

波导中的不均匀性(如圆波导轴线的弯曲、波导半径的渐变等)会引起波导中各传播模式间的能量耦合, 从而产生模式变换。波导中模式间的相互耦合可用耦合波方程来描述<sup>[4~7]</sup>。考虑波导所带来的欧姆损耗, 衰减常数  $\alpha_{mn}$  为

TM 模 
$$\alpha_{mn} = \frac{1}{a} \frac{R_s}{\eta_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{X_{mn}}{2a\eta_0}\right)^2}} \quad (1)$$

TE 模 
$$\alpha_{mn} = \frac{1}{a} \frac{R_s}{\eta_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{X_{mn}}{2a\eta_0}\right)^2}} \left[ \left(\frac{X_{mn}}{2a\eta_0}\right)^2 + \frac{\left(\frac{m}{X_{mn}}\right)^2}{1 - \left(\frac{m}{X_{mn}}\right)^2} \right] \quad (2)$$

式中:  $a$  为波导半径;  $\eta_0 = 376.7$  为自由空间波阻抗;  $\eta_0$  为自由空间波长;  $R_s$  为波导材料的表面电阻率, 对于加工的铝波导,  $R_s = 3.26 \times 10^{-7} \sqrt{f(\text{Hz})}$ 。

## 2 数值计算及结果

圆波导 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 模式变换器的几何结构为圆弧弯曲结构, 如图 1 所示。在 TE<sub>01</sub> 模到 TM<sub>11</sub> 模的转换中, 由于输入模式和输出模式在光滑弯曲圆波导中有相同的相位常数, 所以在它们之间发生的功率转换也最强烈, 适当弯曲光滑圆波导即可使这两个模式之间产生功率的连续耦合, 且 TM<sub>11</sub> 的极化方向垂直于弯曲圆弧平面。因而在弯波导的近似分析中, 可以只考虑输入模 TE<sub>01</sub> 和输出模 TM<sub>11</sub>。在这种情况下, 对应于功率从 TE<sub>01</sub>

\* 收稿日期: 2002-01-17; 修订日期: 2002-04-12  
基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-7); 大功率微波电真空器件技术国防重点实验室资助课题  
作者简介: 牛建新(1969-), 男, 博士生, 主要从事高功率微波传输线及模式转换器研究; E-mail: niuxinjian@sohu.com。

模全部转换为  $TM_{11}$  模的弯波导转换角称为临界角  $\theta_c$ 。因为弯波导的转角  $\theta = L/R$ ,  $L$  是轴线弯曲圆弧的长度, 则弯波导  $TE_{01}$  模到  $TM_{11}$  模能量全转换的公式可简化为<sup>[3]</sup>

$$c = n \times \frac{0}{2 \cdot 1.1595 a} = n \times 1.3547 \frac{0}{a} \text{ (rad)},$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中:  $a$  为圆波导半径, 从(3)式可以看出, 发生功率全转换的临界角  $\theta_c$  和弯波导的曲率半径  $R$  无关。也就是说, 从两波耦合的近似分析得出, 只要弯曲波导的转角  $\theta_c =$ , 就可以实现从  $TE_{01}$  到  $TM_{11}$  的功率全转换, 而与曲率无关。

实际上, 弯曲波导中应考虑多模耦合才能得出正确的结果。本文以频率为 35 GHz, 半径为 13.6 mm 的弯曲圆波导为例进行优化模拟, 计算中对多模因素的影响、反向波的影响、欧姆损耗、波导轴线的弯曲以及相位重匹配等因素均进行了较为周详的考虑。输入模式是  $TE_{01}$  模, 进入变换器后, 与之相耦合的是  $TE_{11}$ ,  $TE_{12}$  和  $TM_{11}$  模, 同时还与  $TE_{21}$ ,  $TM_{21}$  产生二次耦合, 对模式间的耦合系数分析可知, 其它模式间的耦合比较弱, 且其输出幅值很小, 计算中可以不予考虑<sup>[1,8]</sup>。因此在此计算中主要考虑  $TE_{01}$ ,  $TE_{11}$ ,  $TE_{12}$ ,  $TM_{11}$ ,  $TE_{21}$  和  $TM_{21}$  六个模式。

在圆波导弯曲角为临界角 ( $\theta_c = 48.8863^\circ$ ) 的情况下, 对  $TE_{01}$ — $TM_{11}$  模式变换器在不同弧长下进行了数值模拟, 发现若只考虑输入模  $TE_{01}$  和输出模  $TM_{11}$ , 能量的全转换与波导弯曲曲率(或弧长  $L = R$ ) 无关。但实际上应考虑多模因素, 且计算表明, 此时能量转换与波导曲率或弧长有关, 图 2 表示在考虑不同耦合模式数时, 转换效率与弧长的关系。由图 2 看出, 效率将随弧长的增长而增大, 其间存在若干局部极值点, 随着弧长增加到一定长度, 转换效率便没有显著的增长。从实际设计的角度来考虑, 要求变换器具有紧凑和宽带的特性, 可适当选取效率极值点来确定变换器的几何结构参数。

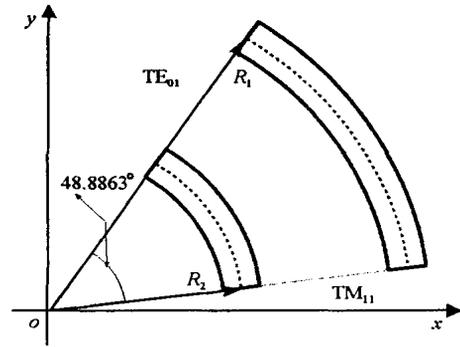


Fig. 1 Two geometry structure of  $TE_{01}$ — $TM_{11}$  mode converter decided by critical angle  
图 1 临界角所确定的两种弧长的  $TE_{01}$ — $TM_{11}$  模式变换器的几何结构示意图

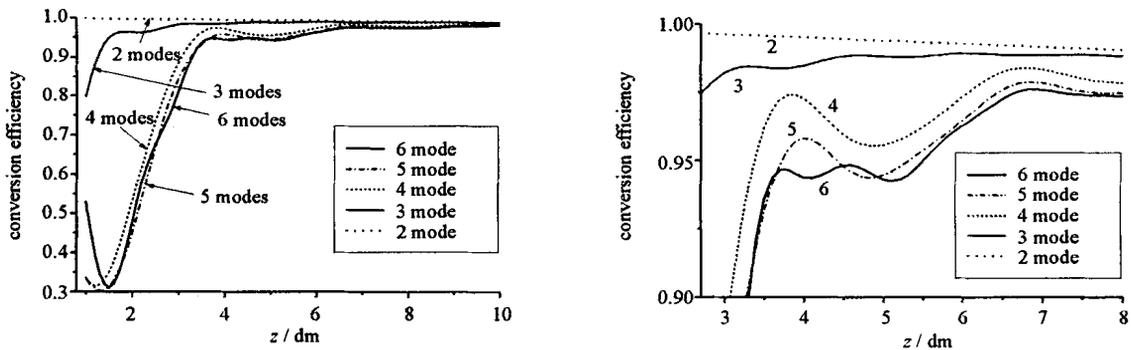


Fig. 2 Results of different arc length with  $\theta_c =$

图 2 当  $\theta_c =$  时, 在弯曲波导不同弧长下计算的结果

考虑六模因素时, 由效率极值点可确定两个不同弧长的模式变换器, 它们都能实现模式的高效转换, 但在考虑了多模因素后, 输入模式的能量并不能达到完全转换, 其结果如表 1 和图 1, 3, 4 所示。在图 3, 4 中可以看到两种弧长下各模式的功率沿轴线分布的结果, 其中, 第一种变换器较长但转换效率高, 第二种变换器短但转换效率低, 且  $TE_{21}$  模在第一种变换器中有两个波峰, 在第二种变换器中只有一个波峰, 而  $TE_{12}$ ,  $TM_{11}$  和  $TM_{21}$  模的波峰周期数也分别减半。

考虑多模因素时, 将弯曲角与弧长同时作为优化参量进行数值计算。由于寄生模式之间的相互耦合, 由耦合波方程<sup>[4]</sup>优化出来的能量转换角 ( $49.2052^\circ$ ) 和按公式(3)计算出的临界角 ( $48.8863^\circ$ ) 相比有小的改变, 数值模拟的转换角在临界角的附近, 说明临界角有一定的参考价值, 如表 2 所示。

表 1 在临界角  $\epsilon_c = 48.8863^\circ$  的情况下,两种弧长结构的 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 模式变换器

Table 1 Results of the two bents with the critical angle  $\epsilon_c = 48.8863^\circ$

number of mode	case		long arc structure		short arc structure		
	critical angle / (°)	curvature / dm <sup>-1</sup>	arc length / dm	conversion efficiency	curvature / dm <sup>-1</sup>	arc length / dm	conversion efficiency
2	48.886 299	0.140 335	6.079 924	0.992 854	0.234 459	3.639 124	0.995 716
3	48.886 299	0.140 325	6.080 362	0.989 250	0.234 459	3.639 127	0.983 873
4	48.886 299	0.125 695	6.788 059	0.984 065	0.221 845	3.846 051	0.974 185
5	48.886 299	0.124 583	6.848 615	0.978 804	0.212 724	4.010 955	0.957 992
6	48.886 299	0.123 912	6.885 701	0.976 084	0.228 105	3.740 502	0.946 698

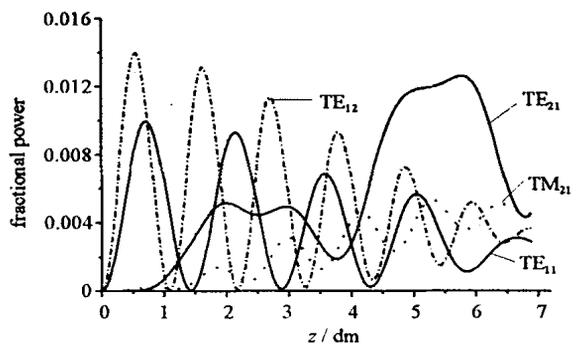
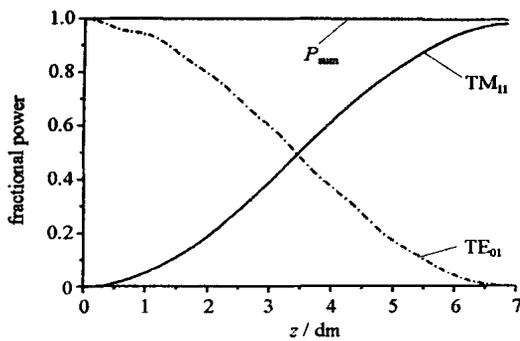


Fig. 3 Calculated fractional power in desired and unwanted modes with long arc structure

图 3 长弧结构中的各阶模式相对功率沿轴线的分布

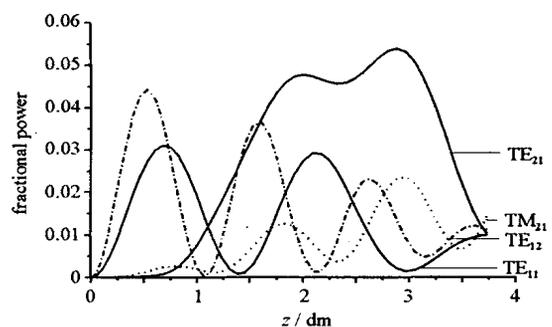
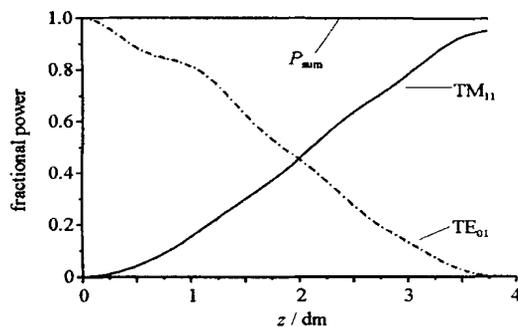


Fig. 4 Calculated fractional power in desired and unwanted modes with short arc structure

图 4 短弧结构中的各阶模式相对功率沿轴线的分布

表 2 在考虑多模因素时,优化出的能量全转换角和所确定的几何结构

Table 2 Optimal results with the multimode factor

number of mode	curvature / dm <sup>-1</sup>	arc length/ dm	bent angle/ (°)	conversion efficiency
4	0.127 313	6.781 218	49.465 722	0.984 376
5	0.126 043	6.843 462	49.421 854	0.979 066
6	0.124 768	6.883 073	49.205 235	0.976 179

同时对于弯曲结构的圆波导模式变换器,在优化的过程中,其圆波导的半径、弯曲圆波导的曲率和频率以及频带宽度之间的变化规律,和双弯结构有相同的结论<sup>[7]</sup>。即在同一频率下,随着波导半径的减小,变换器的长度逐渐缩短,模式变换效率略有增大;在同一圆波导半径的情况下,随着频率的增大,变换器的弯曲曲率逐渐减小,长度逐渐增长,带宽逐渐变窄,模式变换的效率略有降低。

### 3 结论

弯曲圆波导 TE<sub>01</sub>—TM<sub>11</sub> 模式转换临界角  $\epsilon_c(48.8863^\circ)$  的存在是在只考虑输入、输出模的一个近似结果,该结果在优化计算所得的能量转换角(49.205 2°)附近,这说明临界角在计算弯曲角时有一定的参考价值。同

时,若考虑多模情况时,临界角并不能实现能量的全转换,且能量的全转换与波导曲率或弧长是相关的。

### 参考文献:

- [1] Thumm M. High - power millimeter wave mode converter in over - moded circular waveguides using periodic wall perturbations[J]. *Int J Electronics*, 1984, **57**(6): 1225—1246.
- [2] Thumm M, Jacobs A, Ayza M S, et al. Design of short high - power  $TE_{11}$ — $HE_{11}$  mode converters in highly overmoded corrugated waveguides[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1991, **39**(2): 301—309.
- [3] 黄宏嘉. 微波原理(卷 ) [M]. 北京:科学出版社, 1965. 264—270. (Huang H J. Microwave principle. Beijing: Science Press, 1965. 264—270)
- [4] Li H F, Thumm M. Mode conversion due to curvature in corrugated waveguides[J]. *Int J Electronics*, 1991, **71**(2): 333—347.
- [5] Li H F. Study on mode coupling coefficients in curved corrugated circular waveguides[J]. *Chinese Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1991, **11**(6): 543—549.
- [6] 李宏福. 弯曲圆波导模式耦合的研究[J]. 电子科技大学学报, 1991, **20**(5): 491—496. (Li H F. A study on mode coupling in curved circular waveguides. *Journal of University of Science & Technology of China*, 1991, **20**(5): 491—496)
- [7] 牛新建, 李宏福, 谢仲怜. 高功率毫米波圆波导  $TM_{01}$ — $TE_{11}$ 模式变换分析[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(1): 90—94. (Niu X J, Li H F, Xie Z L. Analysis of high - power millimeter wave circular waveguide  $TM_{01}$ — $TE_{11}$  mode converter. *High power laser and particle beams*, 2002, **14**(1): 90—94)
- [8] Vinogradov D V, Denisov G G. Waveguide mode converters with step type coupling[J]. *Int J of IR/ MM Waves*, 1991, **12**(2): 131—140.

## Analysis of high power bent circular waveguide $TE_{01}$ — $TM_{11}$ mode converter of critical angle

NIU Xirjian, LI Hongfu, YU Sheng, XIE Zhonglian

( Institute of High Energy Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Based on the mode coupling theory, this paper analyzes the critical angle of the  $TE_{01}$ — $TM_{11}$  mode converter completely by traditional waveguide axis constant curvature. Energy converted from  $TE_{01}$  to  $TM_{11}$  mode by all under the critical angle with multi-mode factor is got. The actual optimum angle of energy complete conversion is in the neighborhood of critical angle, and conversion efficiency is related to the curvature of bent waveguide.

**Key words:** circular waveguide; bent waveguide; mode conversion; coupled wave equations