

文章编号: 1001-4322(2002)05-0753-04

高功率弯波导 TE₀₁—TM₁₁ 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 TE₀₁—TM₁₁ 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 TE₀₁—TM₁₁ 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 TE₀₁ 模或 TE₀₂ 模, 不便直接使用, 需要进行模式变换。作者考虑采用 TE_{0n}—TE₀₁—TM₁₁—HE₁₁^[1,2] 变换序列, 用 TM₁₁ 模作为中介极化模, 然后再转换为 HE₁₁ 模向外辐射, 而 TE₀₁—TM₁₁ 的变换是这一变换序列的关键。在 TE₀₁ 波到 TM₁₁ 波的模式转换中, 由于 TE₀₁ 波和 TM₁₁ 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 TE₀₁ 波和 TM₁₁ 波, 并且恰当地选择一段圆弧形的单弯曲圆波导即可实现 TE₀₁—TM₁₁ 的变换。在此近似分析中, 存在功率完全转换的临界角 θ_c , 可以使 TE₀₁ 波的功率全部转换到 TM₁₁ 波, 且发生功率全转换的转角(临界角) θ_c 和弯波导的半径 R (或曲率 $1/R$) 无关^[3]。对耦合系数的分析可知, 在 TE₀₁ 波和 TM₁₁ 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 TE₀₁—TM₁₁ 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^[4~7]。考虑波导所带来的欧姆损耗, 衰减常数 α_{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; λ_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 TE₀₁—TM₁₁ 模式变换器的几何结构为圆弧弯曲结构, 如图 1 所示。在 TE₀₁ 模到 TM₁₁ 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 TM₁₁ 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 TE₀₁ 和输出模 TM₁₁。在这种情况下, 对应于功率从 TE₀₁

* 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 θ_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^[3]

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

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

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 θ_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 $\theta_c = \theta$, 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^[1,8]。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。

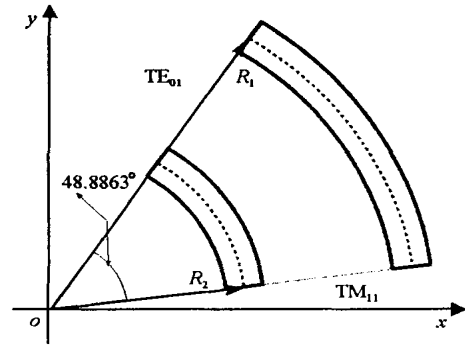


Fig. 1 Two geometry structure of TE_{01} — TM_{11} mode converter decided by critical angle
图 1 临界角所确定的两种弧长的 TE_{01} — TM_{11} 模式变换器的几何结构示意图

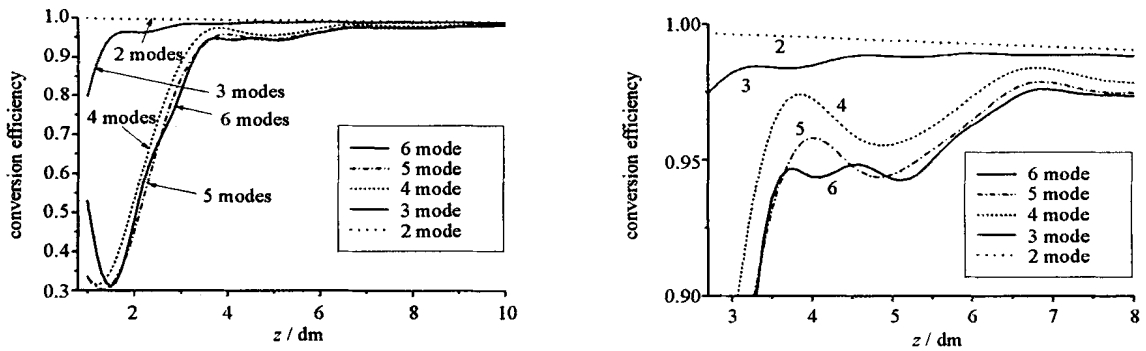


Fig. 2 Results of different arc length with $\theta_c =$

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^[4]优化出来的能量转换角 (49.2052°) 和按公式(3)计算出的临界角 (48.8863°) 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 TE₀₁—TM₁₁ 模式变换器

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

case	long arc structure				short arc structure		
	critical angle / (°)	curvature / dm ⁻¹	arc length / dm	conversion efficiency	curvature / dm ⁻¹	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

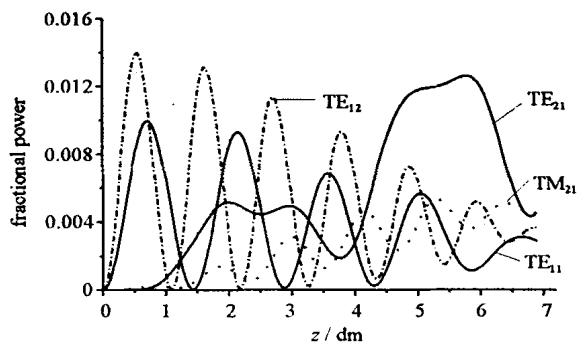
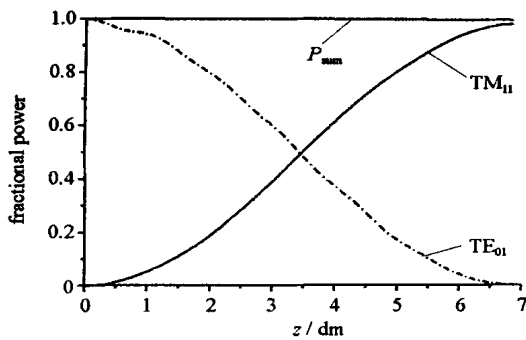


Fig. 3 Calculated fractional power in desired and unwanted modes with long arc structure

图 3 长弧结构中的各阶模式相对功率沿轴线的分布

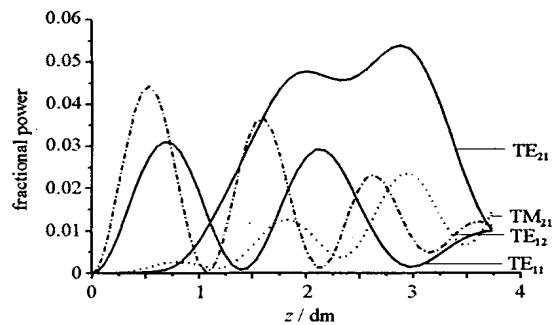
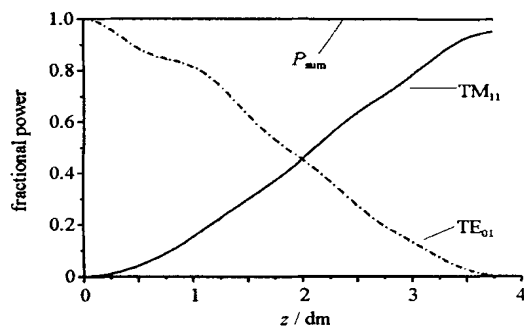


Fig. 4 Calculated fractional power in desired and unwanted modes with short arc structure

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 ⁻¹	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^[7]。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 TE₀₁—TM₁₁ 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 Hong-fu, YU Sheng, XIE Zhong-lian

(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