

文章编号:1001-9014(2006)01-0067-04

过模弯曲圆波导模式耦合设计

牛新建, 喻胜, 李宏福, 邓学, 徐勇
(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:基于耦合波理论,波导轴线采用常规圆弧弯曲和改进的正弦弯曲结构,对 TE_{01} — TM_{11} 模式变换器进行全面优化分析,计算中考虑了多模、反向波、金属壁所带来的欧姆损耗以及相位重匹配等因素.以正弦弯曲设计的Ka波段 TE_{01} — TM_{11} 模式变换器的转换效率达到99%,带宽超过32%,并得出常弯曲结构中波导半径、波导曲率、变换器长度和转换效率之间的关系.

关键词:高功率微波;弯曲波导;模式耦合
中图分类号:TN811;TN814 **文献标识码:**A

DESIGN MODE COUPLING FOR OVERMODED BENT CIRCULAR WAVEGUIDE

NIU Xin-Jian, YU Sheng, LI Hong-Fu, DENG Xue, XU Yong

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

Abstract:Based on the mode coupling theory, the design of TE_{01} — TM_{11} mode converter geometry configuration with traditional waveguide axis constant curvature and improved waveguide axis sinusoidal curvature was presented for more acceptable geometry parameters. More considerations were given to the influences of multimode factor, backward wave, ohmic losses carried from metal wall and phase rematch. The conversion efficiency of Ka waveband with waveguide axis sinusoidal curvature is about 99% with bandwidth of 32%. At the same time, the relation among the radius and curvature of circular waveguides, the length of converter and converting efficiency is obtained.

Key words:high power microwave; bent waveguide; mode coupling

引言

高功率微波器件可产生几百千瓦至几兆千瓦的脉冲功率,其输出模式常不适用于等离子体加热、远距离传输和雷达的直接使用,需要进行高功率模式变换.其外接的波导模式变换器主要采用以下两种变换序列^[1]:

1) TE_{0n} (回旋管)— TE_{01} (低损耗传输)— TE_{11} — HE_{11} (天线)

2) TE_{0n} (回旋管)— TE_{01} (低损耗传输)— TM_{11} — HE_{11} (天线)

第一个变换序列,采用 TE_{11} 模作为线极化中介模,其优点是整个变换序列没有大的弯曲,只要沿线旋转 TE_{01} — TE_{11} 传输段就可轻易改变极化方向.但由于 TE_{01} — TE_{11} 变换需要多个拍频波长才能实现能量的完全转换,故频带宽度较窄.采用波导轴线蛇

形线微扰的方法将 TE_{01} 模转换为线极化 TE_{11} 模,而 TE_{11} 到 HE_{11} 的变换可采用圆周开槽直波导的结构,且槽深从二分之一波长渐变为四分之一波长.同样若以 TM_{11} 模作中介极化模,也可实现准高斯模 HE_{11} ,由于 TE_{01} — TM_{11} 有弯曲变换段,其极化方向的改变不易实现,但有较宽的带宽.由于 TE_{01} 模与 TM_{11} 模为简并模,采用光滑波导圆弧弯曲的结构并优化出适当的弯曲角,可将 TE_{01} 模转换为 TM_{11} 模,而 TM_{11} 到 HE_{11} 的变换可采用圆周开槽直波导的结构,且槽深从零渐变为四分之一波长.

在两个变换序列中,为了在过模光滑圆波导中进行长距离传输(ohmic losses < 1 dB/km),需采用周期性、轴对称半径微扰将回旋管输出的 TE_{0n} 混合模转换为非极化对称模 TE_{01} 模.同时也要考虑对 TE_{0n} 混合模之间相位的适当匹配.

在此采用第二种变换序列,用 TM_{11} 模作为中介

收稿日期:2005-05-30,修回日期:2005-10-16

Received date: 2005-05-30, revised date: 2005-10-16

基金项目:国防重点实验室基金项目(51440040204DZ02);电子科技大学青年基金资助课题(JX04021).

作者简介:牛新建(1969-),男,河南新密人,讲师,博士,研究方向:微波电子学及高功率微波技术.

极化模,然后转换为 HE_{11} 模向外辐射,而 $TE_{01} - TM_{11}$ 变换是这一变换序列的关键. 由于 TE_{01} 与 TM_{11} 有相同的相速,因此恰当选择一段圆弧形的单弯曲圆波导即可实现 $TE_{01} - TM_{11}$ 的变换^[1]. 在文献[2]中,采用波导轴线常弯曲方法,其转换效率为 95%,采用波导轴线简单的正弦弯曲方法 $y(z) = \varepsilon \cos(2\pi z/W)$,其转换效率也只有 95.3%. 本文改进了正弦弯曲结构,对模式变换器进行优化计算,设计的频率 35GHz、波导半径 13.6mm $TE_{01} - TM_{11}$ 模式变换器的转换效率达到 99%,带宽超过 32%,而其长度只有 386mm,是一种紧凑、高效、宽带的模式变换器.

1 耦合波基本原理

波导中的不均匀性会引起传播模式间的能量耦合,产生模式变换. 波导中模式间的能量耦合可用耦合波方程来描述. 轴线弯曲圆波导模式变换的基本方程为^[3]

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

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

式中 A_{mn}^+ , A_{mn}^- 表示正向与反向传播的 (mn) 波的幅值, $C_{(m'n')(mn)}^+$, $C_{(m'n')(mn)}^-$ 表示 (mn) 波与同向或反向 $(m'n')$ 波的耦合系数, $\gamma_{mn} = \alpha_{mn} + j\beta_{mn}$ 为 (mn) 模的传播常数, α_{mn} 为衰减常数, β_{mn} 为相位常数. 设模式变换器的长度为 L , 其输入端有入射波, 令其终端反向波为 0, 即有边界条件

$$A_{mn}^+ |_{z=0} = [(1, 0), (0, 0), \dots, (0, 0)]^T, \quad (3)$$

$$A_{mn}^- |_{z=L} = [(0, 0), (0, 0), \dots, (0, 0)]^T, \quad (4)$$

上式连同式(1)、(2)一起构成耦合波微分方程组的边值问题, 求解该问题即可求得轴线弯曲的前向波幅复数值 A_{mn}^+ 和反向波幅复数值 A_{mn}^- 沿 z 轴的分布.

圆波导轴线弯曲, 其角向结构发生了变化, 则耦合原则为 $\Delta m = \pm 1$. 为进一步抑制寄生模式的幅值, 提高转换效率, 可采用以下几种耦合结构^[4]:

(1) 轴线轴线常弯曲或正弦弯曲结构

$$y(z) = \varepsilon_1 \cos \frac{2\pi z}{W_1} - \varepsilon_2 \sin \frac{2\pi z}{W_2} - \varepsilon_3 \sin \frac{2\pi z}{W_3}. \quad (5)$$

(2) 波导轴线高斯曲线弯曲结构

$$y(z) = \varepsilon_1 e^{-\delta z^2} - \varepsilon_2 \sin \frac{2\pi z}{W_2} - \varepsilon_3 \sin \frac{2\pi z}{W_3}. \quad (6)$$

以上各式中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为叠加的微扰幅度, 对轴线在 $y-z$ 平面内弯曲的结构, $y(z)$ 为其轴线弯曲的形式, W_1, W_2 为与拍频波长 λ_w 相关的微扰优化变量. 对于正弦或余弦变化的模式变换器, 其转换效率与壁扰动的初始相位有关^[5], 可由以下几种不同的相位重匹配技术组合而得到提高:

(1) 主要波动几何周期 λ_w 的改变

$$\lambda_w = (1 + \delta) \lambda_{B[m_p, m_q]} \quad (7)$$

(2) 在适当位置放置一段直波导作为相位延迟段

(3) 沿轴向扰动幅度渐变.

采用以上耦合结构和相应的相位重匹配技术, 可实现模式的高效转换.

2 数值计算及结果

由于 TE_{01} 模和 TM_{11} 模在光滑弯曲圆波导中有相同的相位常数, 适当弯曲光滑圆波导即可使这两个模式间发生功率连续耦合. 计算中对多模、反向波、金属壁所带来的欧姆损耗以及相位重匹配等因素进行了详细考虑. 输入 TE_{01} 模进入变换器后, 与之相耦合的是 TE_{11} 、 TE_{12} 和 TM_{11} 模, 还寄生 TE_{21} 、 TM_{21} 模并发生 2 次耦合. 由模式间的耦合系数分析可知, 其它模式间的耦合比较弱, 计算中可不予考虑, 因此仅考虑 TE_{01} 、 TE_{11} 、 TE_{12} 、 TM_{11} 、 TE_{21} 和 TM_{21} 6 个模式. 为了减小其它模式的耦合功率, 弯曲波导必须足够长, 同时, 为了减少波导壁损耗和增加带宽, 变换器又要尽量短. 为克服这一矛盾, 根据文献[6], 适当改变波导弯曲的结构, 可有效抑制寄生模式的耦合, 提高模式转换效率. 由于耦合系数是与波导弯曲曲率相关的量, 且影响模式间的耦合强度^[5]. 在常曲率弯曲结构中, 每个模式之间的耦合强度是不变的, 而变曲率(正弦弯曲)结构中, 每个模式之间的耦合强度是随曲率而改变的, 这样可通过优化使向寄生模式的耦合减弱, 向转换模式的耦合增强, 从而提高模式的转换效率. 本文采用两种结构: 常弯曲波导构成的 $TE_{01} - TM_{11}$ 模式变换器和正弦弯曲波导构成的 $TE_{01} - TM_{11}$ 模式变换器. 与一般文献方法不同, 此处采用如公式(5)所描述的正弦弯曲结构, 通过优化计算, 增大曲率变化范围, 加强入射波和输出波之间的耦合强度, 达到在高转换效率下, 既减小模式变换器的长度, 又得到宽的频带. 其优化结果 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为 6.091, -0.337, -0.025, W_1, W_2, W_3 分别为 46.813, 7.961, 2.679. 从图 1, 2 中的计算结果可以看出, 采用改进的正弦弯曲波导的结构可有效地降低

TE₁₁、TE₂₁输出功率,从而使转换效率 η 提高到 99%, 带宽达到 32%, 并使长度缩短为 386mm, 得到变换器的最优几何结构。

对单弯曲波导结构的模式变换器,其圆波导半径、圆波导弯曲曲率和频率及频带宽度间的变化规律,和双弯曲结构不同^[5]。在同一频率下,随波导半径的减小,变换器的长度缩短,转换效率略有降低,如图 3 示;在同一圆波导半径下,随频率的增大,变换器的弯曲曲率减小,模式变换效率略有降低,如图 4、5 所示。

3 结语

模式变换器的几何结构依赖于转换模式的类型。若输入、输出模式有相同的角模数,且只简单改

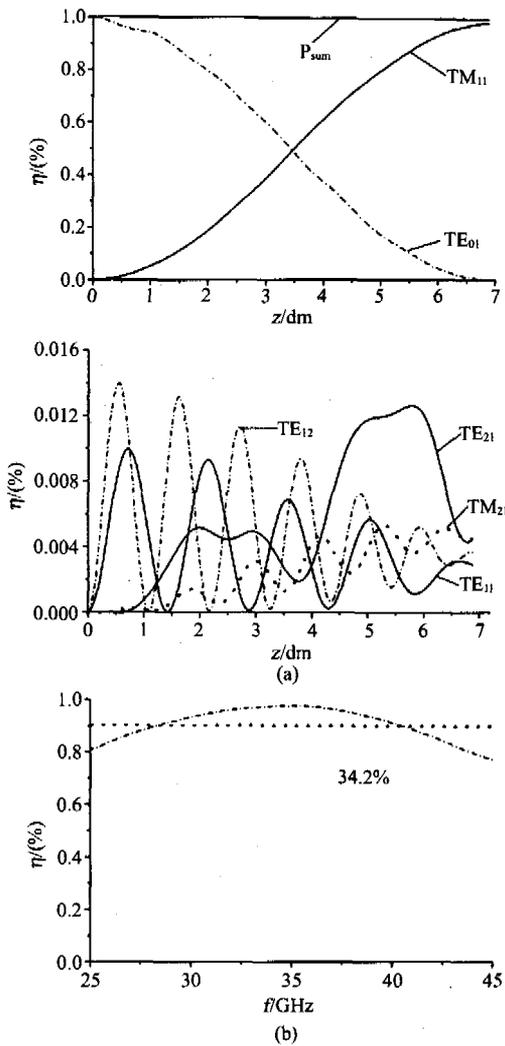


图 1 在波导轴线常弯曲情况下,频率为 35GHz、半径为 13.6mm,各阶模式的相对功率沿轴线的分布(a)及带宽(b)

Fig.1 Fractional power with mode converter in constant curvature (a) and bandwidth (b) distribution

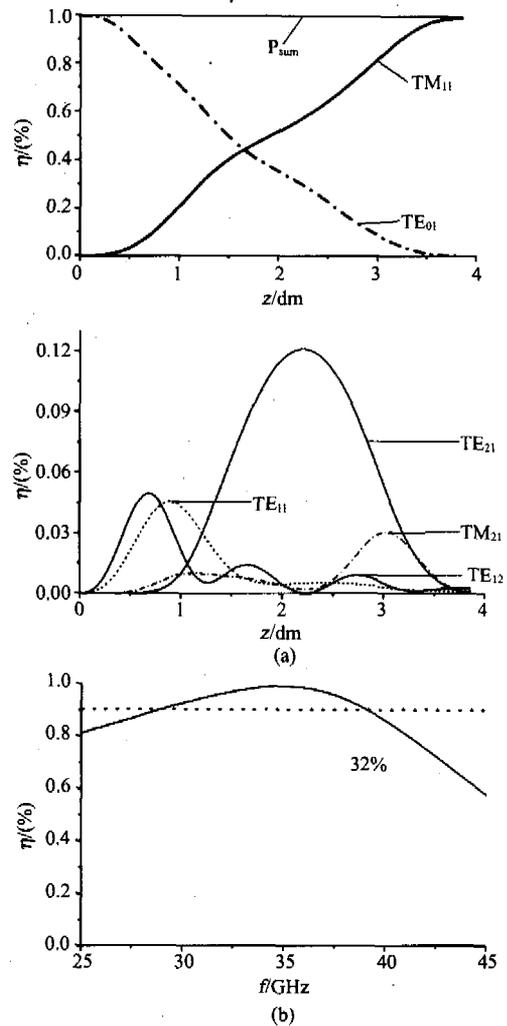


图 2 在波导轴线正弦弯曲情况下,频率为 35GHz、半径为 13.6mm,各阶模式的相对功率沿轴线的分布(a)及带宽(b)

Fig.2 Fractional power with mode converter in sinusoidal curvature (a) and bandwidth (b) distribution

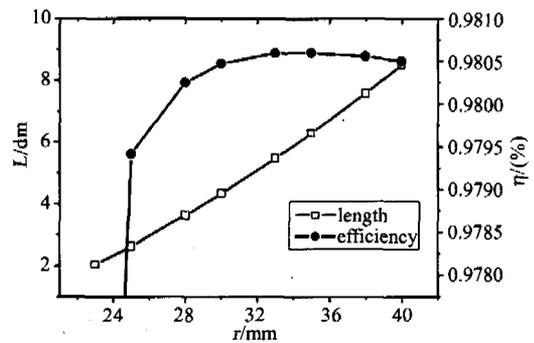


图 3 同一频率下,波导半径 r 、变换器长度 L 及转换效率 η 之间的关系

Fig.3 Results of the converter depend on the same frequency and different waveguide radius

变径模数时,可采用轴对称周期微扰结构;若有相同

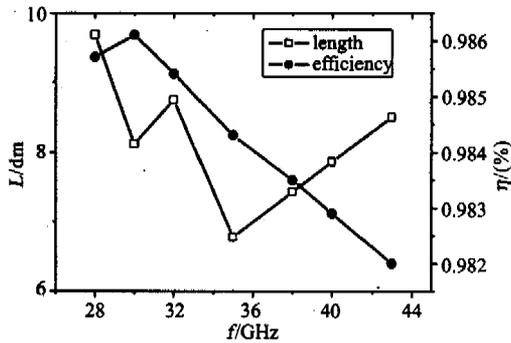


图4 同一波导半径下,频率 f 、变换器长度 L 及效率 η 之间的关系

Fig. 4 Results of the converter depend on the same waveguide radius and different frequency

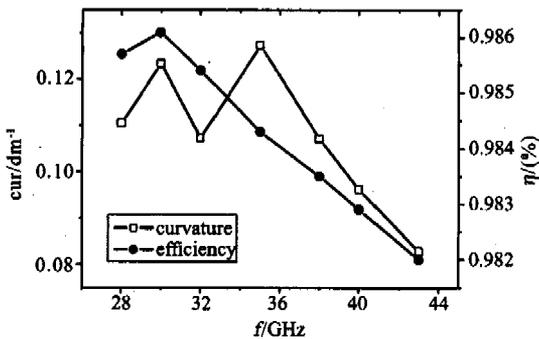


图5 同一波导半径下,频率 f 、波导弯曲曲率 cur 及效率 η 之间的关系

Fig. 5 Results of the converter depend on the same waveguide radius and different frequency

的径模数而改变角模数时,可采用蛇形线周期微扰结构.若采用非周期结构可有效缩短变换器长度.采用非周期结构的单圆弧弯曲和改进的正弦弯曲结构,对 TE_{01} — TM_{11} 模式变换器进行数值研究,设计的Ka波段 TE_{01} — TM_{11} 模式变换器的转换效率达到99%,带宽超过32%,实现了紧凑、高效和宽带的最优结构.

REFERENCES

- [1] Manfred K Thumm, Walter Kasperek. Passive high-power microwave components[J]. *IEEE Trans on plasma science*, 2002, 30(3): 755—786.
- [2] Kuntze M, Alberti S, Dammertz G, et al. Advanced high-power gyrotrons[J]. *IEEE Trans on plasma science*, 2003, 31(1): 25—31.
- [3] LI Hong-fu, Thumm. M. Mode conversion due to curvature in corrugated waveguides[J]. *International Journal of Electronics*, 1991, 71(2): 333—347.
- [4] Yang Shiwen, Li Hongfu. Optimization of novel high-power millimeter-wave TM_{01} — TE_{11} mode converters [J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45(4): 552—554.
- [5] CHEN Li-Wei, NIU Xin-Jian, LI Xiao-Yan, et al. Phase rematch on high-power millimeter wave mode converter[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈立伟, 牛新建, 李晓燕, 等. 高功率毫米波模式变换中的相位重匹配. *红外与毫米波学报*) 2004, 23(1): 51—54.
- [6] Wes Lawson, Melany R Arjona, Bart P Hogan, et al. The design of serpentine-mode converters for high-power microwave applications [J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*. 2000, 48(5), 809—814.

光学学会 2006 年大会安排 15 个专题会议(分会场):

1. 量子光学与非线性光学, 2. 生物与医学光学, 3. 激光物理与技术, 4. 光学功能材料, 5. 集成光子学与光纤光学, 6. 光通信与光传感, 7. 光学存储与光全息, 8. 工程光学与光学制造, 9. 光电技术与系统, 10. 光学薄膜技术, 11. 超快光学, 12. 光学微系统与微纳米技术, 13. 颜色光学、眼(科)光学和仪器, 14. 激光加工技术, 15. 光学教学研究。

会议论文提交截止时间:2006年6月15日(论文提交请见会议网站及第二轮通知)

承办单位地址:广州市华南师范大学信息光电子科技学院

邮政编码:510631

电话: +86 -020 -39310309, +86 -020 -85216848 传真: +86 -020 -39310311

联系人:崔红丽,罗爱平

电子邮箱:guangd@s.cnu.edu.cn(崔红丽), luoaiping2003@126.com(罗爱平)

本会议建立了会议网页,网址为:<http://laser.scnu.edu.cn/final/index2.htm>。敬请大家访问浏览,了解会议细节和相关的最新信息。