

文章编号: 1001-4322(2009)02-0255-05

高功率微波弯曲圆波导设计*

袁成卫, 钟辉煌, 钱宝良

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 报道了可分别传输 TM_{01} 模和 TE_{01} 模的两种弯曲圆波导的设计方法和计算结果。研究表明:所设计的 TM_{01} 模弯曲波导和 TE_{01} 模弯曲波导在中心频率上传输效率均超过 99.5%, 传输效率大于 95% 的带宽分别达到 20.0% 和 14.4%; 该两个弯曲波导也分别适用于传输 TE_{11} 模和 TM_{11} 模; 水平极化 TE_{11} 模与 TM_{01} 模、垂直极化 TM_{11} 模与 TE_{01} 模在弯曲圆波导中传输时具有相似的传输效率和频带特性; 而垂直极化 TE_{11} 模、水平极化 TM_{11} 模由于不易和其它模式耦合, 在弯曲波导中传输时具有较高的传输效率。

关键词: 高功率微波; 过模圆波导; 传输线; 模式耦合理论

中图分类号: TN814 **文献标志码:** A

许多高功率微波源都输出圆波导轴对称模式, 如圆波导 TM_{01} 模或 TE_{01} 模等^[1], 它们不是圆波导内的最低阶模, 必须在过模波导内传输, 因而在传输过程中若遇到某种不均匀性, 很容易引发其它模式, 从而降低自身的传输效率。另一方面, 随着高功率微波技术的日益实用化, 在一些应用情况下^[2], 需要将微波模式传输一段距离, 例如从微波源传输到发射天线, 这中间需要设计一段或数段弯曲波导。根据模式耦合理论, 当波导的轴线弯曲时, 波导内传输的模式会部分或全部转变成其它模式, 从而影响传输线输出微波的模式或纯度。对于弯曲圆波导, 避免输入的微波模式发生能量转化, 保证输出模式与输入模式的一致性, 是应用中必须解决的一个难题。本文将根据模式耦合理论, 研究传输 TM_{01} 或 TE_{01} 模的过模弯曲圆波导结构设计, 使输入 TM_{01} 或 TE_{01} 模经过弯曲波导后仍保持为原来的模式, 而不转换或引发其它模式。同时, 也将对 TE_{11} , TM_{11} 等常用模式在弯曲波导中的传输进行讨论。

1 模式耦合理论

均匀线性无源波导中的本征模式是相互正交的, 其间不存在能量耦合, 若波导中引入扰动或者某种不均匀性, 则不同模式之间就可能发生能量转换。波导轴线弯曲是波导不均匀性的一种, 会引起波导中不同传输模式间的能量耦合, 从而产生模式转换。当光滑圆波导的轴线在一个平面内弯曲时, 波导中的 mn 模 (TE_{mn} 模或 TM_{mn} 模) 与 $m'n'$ 模之间产生耦合的原则是^[3-4]: (1) mn 模与 $m'n'$ 模满足 $|m-n'|=1$; (2) 极化方向一致的模式可以相互耦合, 即同为垂直极化的模式或同为水平极化的模式之间可能发生能量耦合。这里, 垂直极化模式是指在波导轴线弯曲所在平面上, 微波模式的电场垂直于该平面的模式; 水平极化模式则是指在波导轴线弯曲所在平面上, 电场平行于该平面的模式。依此定义, TM_{01} 模为水平极化模式, TE_{01} 模为垂直极化模式, TE_{11} , TM_{11} 等非轴对称模式则都包含两个极化方向相互正交的兼并模。

一段弯曲圆波导的结构如图 1 所示。波导横截面的半径为 a , 波导轴线的曲率半径为 R , 该段弯曲波导的弯曲角度为 θ , z 轴为弯曲波导的轴线。在这样一个波导中, 各耦合模之间的关系满足耦合波微分方程组^[4]

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

式中: A_{mn}^+ , A_{mn}^- 分别表示前向传播与后向传播的 mn 模的复幅值; $C_{(m'n')(mn)}^+$ 表示 mn 模与其同向传播的 $m'n'$ 模的耦合系数; $C_{(m'n')(mn)}^-$ 表示 mn 模与其

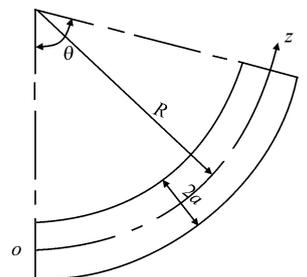


Fig. 1 Geometry of the bend circular waveguide

图 1 弯曲圆波导示意图

* 收稿日期: 2008-03-20; 修订日期: 2008-09-01

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 袁成卫 (1974—), 男, 博士, 主要从事高功率微波技术和应用研究; ehfz_yew@163.com.

反向传播的 $m'n'$ 模的耦合系数,文献[4]给出了不同模式之间耦合系数的表达式,它们与波导轴线的曲率半径 R 成反比; $\gamma_{mn} = \alpha_{mn} + j\beta_{mn}$ 为 mn 模的传播常数,其中 α_{mn} 为衰减常数, β_{mn} 为相移常数。模式耦合理论已广泛应用于弯曲形模式转换器的设计^[5-9],根据模式耦合理论编写的计算程序,可完成任意弯曲波导内的模式耦合计算和弯曲波导结构的优化设计,计算结果与软件仿真和实验结果吻合良好。

2 弯曲波导的理论设计

由于方程(1)的复杂性,通常不易得到其解析解,在应用中须借助数学工具进行数值计算。但如果忽略其它模式,只对相互耦合较强的两个模式求解,则可得到解析解,从而为弯曲波导的设计提供帮助。在弯曲波导模式耦合中,两个模式发生强耦合的条件为传输方向一致、相速相近,这种状态称为“模式同步”。圆波导中,与 TM_{01} 模相速较为接近的模式为 TE_{11} 和 TE_{21} 模^[10],但由于 TE_{21} 模不满足 $|m-m'|=1$ 的条件、垂直极化 TE_{11} 模与 TM_{01} 模的极化方向不一致,因此只有水平极化 TE_{11} 模和 TM_{01} 模最易发生耦合;而 TE_{01} 模和 TM_{11} 模由于具有相同的相速^[10],二者之间也极易发生能量转换。需要说明的是,尽管在方程组(1)中若仅考虑两个模式有一定的近似性,但实践证明,它也可以得到与实际情况非常接近的结果^[6-8]。

2.1 传输 TM_{01} 模的弯曲波导设计

对于传输 TM_{01} 模的弯曲波导,设 A_1, A_2 分别表示 TM_{01} 模和水平极化 TE_{11} 模的复振幅,圆波导的输入模式为 TM_{01} 模,则在波导内两个模式的耦合满足下述方程组和初值条件(忽略反射模式的影响)

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dz} = -j\beta_1 A_1 - jC_{12} A_2 \\ \frac{dA_2}{dz} = -j\beta_2 A_2 - jC_{12} A_1 \end{cases}, \quad \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \Big|_{z=0} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: C_{12} 表示 TM_{01} 模和水平极化 TE_{11} 模之间的模式耦合系数^[4],表达式为

$$C_{12} = - \frac{(\beta_1 + \beta_2)ka}{\sqrt{2\beta_1\beta_2}(\nu_{11}^2 - 1)(\nu_{11}^2 - \mu_{01}^2)} \frac{1}{R} \quad (3)$$

式中: ν_{11} 为一阶贝塞尔函数导数的第一个根; μ_{01} 为零阶贝塞尔函数的第一个根; k 为波数。求解方程组(2)可得,在输出口两个模式的功率分别为

$$|A_1|^2 = 1 - \frac{C_{12}^2 \sin^2(\Omega R\theta)}{\Omega^2}, \quad |A_2|^2 = \frac{C_{12}^2 \sin^2(\Omega R\theta)}{\Omega^2} \quad (4)$$

其中

$$\Omega = \sqrt{C_{12}^2 + \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{2}\right)^2} \quad (5)$$

要使 TM_{01} 模通过弯曲波导后仍保持为 TM_{01} 模,即在输出口 TE_{11} 模的幅值为零,须有

$$\sin(\Omega R\theta) = 0 \quad (6)$$

将式(3),(5)代入式(6)可得 TM_{01} 模弯曲波导的设计方程

$$\sqrt{\left[\frac{(\beta_1 + \beta_2)ka}{\sqrt{2\beta_1\beta_2}(\nu_{11}^2 - 1)(\nu_{11}^2 - \mu_{01}^2)} \frac{1}{R}\right]^2 + \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{2}\right)^2} R\theta = P\pi \quad (P = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

因此,对于特定的微波频率,只要选择合适的波导半径 a 、波导弯曲曲率半径 R 或弯曲角度 θ ,使式(7)成立,就可以设计出高效率传输 TM_{01} 模的弯曲波导。

2.2 传输 TE_{01} 模的弯曲波导设计

类似地,对于传输 TE_{01} 模的弯曲波导,可只考虑 TE_{01} 模和垂直极化 TM_{11} 模之间的耦合。令 A_1, A_2 分别表示 TE_{01} 模和垂直极化 TM_{11} 模的复振幅,波导的输入模式为 TE_{01} 模,式(2),(4)~(6)同样适用与分析 TE_{01} 模和 TM_{11} 模之间的耦合。 TE_{01} 模和垂直极化 TM_{11} 模之间的耦合系数为^[4]

$$C_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}\nu_{01}} \frac{ka}{R} \quad (8)$$

类似地,将式(8)代入式(5)和(6),可得 TE_{01} 模弯曲波导的设计方程

$$ka\theta = \sqrt{2}\nu_{01} P\pi \quad (P = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

因此,对于特定的微波频率,只要选择合适的波导半径 a ,弯曲角度 θ ,使式(9)成立,就可以设计出可高效

率传输 TE_{01} 模的弯曲波导。

3 实例分析

3.1 TM_{01} 模弯曲波导

例如,在工作中考虑到实验装置的布局,需要把一个微波源输出的 TM_{01} 模通过弯曲波导转向 90° 后传输到模式转换器和天线,微波源的中心频率为 10 GHz。由式(7)可知,当弯曲角度 θ 确定后,可以通过选择波导半径 a 或弯曲半径 R 两个参数来实现设计目标。在实际工作中,通常可以根据微波源的输出波导半径、加工条件等先确定圆波导的半径 a ,本例中我们选 $a=2.2$ cm。则由式(7)可知当 $P=1,2,3$ 时, R 分别可取 14.15, 53.87, 85.32 cm。由于式(7)为仅考虑了两个模式耦合的结果,因此更加准确的 R 取值还要在此基础上考虑多个模式进行优化。我们应用考虑了 8 个模式相互耦合的计算程序(8 个模式依次为: TE_{11} , TM_{01} , TE_{21} , TM_{11} , TE_{01} , TM_{21} , TE_{12} 和 TM_{12}),对 TM_{01} 模弯曲波导的 R 值进行了参数优化,相关结果以及对应的有限元软件仿真结果如表 1 所示。可以看到, P 越大,由式(7)得到的 R 理论值和优化值越接近, $P>1$ 时具有较高的传输效率和带宽。综合传输效率和带宽,我们取 $R=53.00$ cm,该弯曲波导对 TM_{01} 模的传输效率在中心频率上达到 99.7%,传输效率大于 95%的带宽达到 20.0%。同时也可以看到,应用模式耦合理论编制程序的计算结果与有限元软件仿真结果吻合良好。

表 1 曲率半径取不同值时弯曲波导的性能比较

Table 1 Transmission characteristics of the bend waveguide with different curvature radii

P	R/cm		theoretical transmission efficiency/%		simulated transmission efficiency/%	
	by Eq. (7)	optimized	$f=10$ GHz	bandwidth $\eta>95\%$	$f=10$ GHz	bandwidth $\eta>95\%$
1	14.15	13.95	97.8	8.7	98.2	8.0
2	53.87	53.00	99.7	20.0	99.4	20.4
3	85.32	85.32	99.8	19.4	99.5	19.2

图 2 为 TM_{01} 模在弯曲波导中传输时引发的波导模式及其随波导轴线的分布情况。可以看到 TM_{01} 模在弯曲波导传输过程中主要引发水平极化 TE_{11} 模(TM_{11} , TE_{21} 等模式所占的比例小于 1%), TM_{01} 模和 TE_{11} 模的功率沿波导轴线交替变化,但在输出口所激励起的 TE_{11} 模能量几乎为零,输出微波模式为单一的 TM_{01} 模。这说明, TM_{01} 模在优化设计的弯曲波导中传输时,并非不引发其它杂模,只是我们通过选择合适的弯曲波导结构参数,保证了在输出口所有杂模又重新转换为 TM_{01} 模。

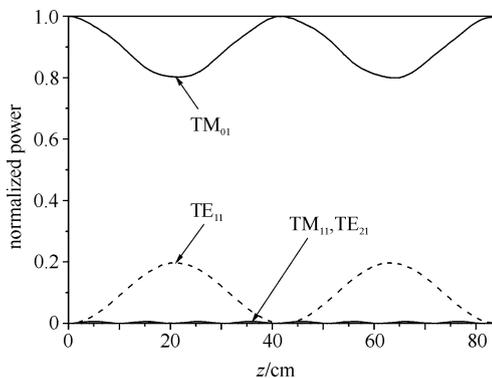


Fig. 2 Power distribution of different modes along the TM_{01} bend circular waveguide

图 2 TM_{01} 模弯曲波导中不同模式归一化功率随波导轴线的变化

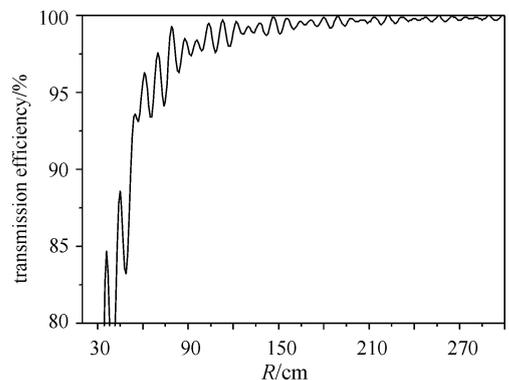


Fig. 3 Transmission efficiency of TE_{01} mode vs curvature radius

图 3 TE_{01} 模弯曲波导传输效率随波导弯曲半径的变化

3.2 TE_{01} 模弯曲波导

类似地,如果欲设计一个传输 TE_{01} 模的 90° 弯曲波导,由式(9)可知,当弯曲角度确定后,可以通过选择波导半径 a 来实现 TE_{01} 模的高效率传输。此处假设 TE_{01} 模由回旋管输出,频率为 35 GHz。当 $P \geq 2$ 时, $a \geq 2.954$ cm,此时由于波导半径过大,导致波导严重过模,不仅不利于设计高传输效率的弯曲波导,同时也很难设计相应的模式转换器,应用价值不高,因此我们仅讨论 $P=1$ 的情况。当 $P=1$ 时,有 $a=1.477$ cm。尽管式(9)显示 TE_{01} 模弯曲波导的结构与弯曲半径 R 无关,但当考虑多个耦合模式时,传输效率与 R 有一定关系。图 3 给出了当 $a=1.477$ cm 时, TE_{01} 模传输效率随弯曲半径 R 的变化关系,可以看到只有当 R 较大时才能获

得较高的传输效率。图4给出了 R 取不同值时 TE_{01} 模传输效率随频率的变化关系,可以看到随着 R 增大,其传输效率越和频带特性都有所提高。当 $R=213.71$ cm时,中心频率上的传输效率达到99.9%,传输效率高于95%的带宽达到14.4%。图5给出了 TE_{01} 模在弯曲波导内传输时引发的其它模式的功率分布随波导轴线的变化关系,可以看到 TE_{01} 模在弯曲波导内传输时会逐渐转变为以垂直极化 TM_{11} 为主的其它模式($TE_{11}, TE_{21}, TE_{12}$ 等模式所占的比例小于0.1%),但在输出口垂直极化 TM_{11} 模又重新转换为 TE_{01} 模,保证了该段弯曲波导的输出模式仍为纯度较高的 TE_{01} 模。

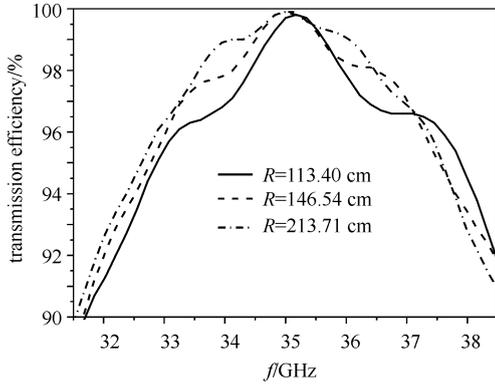


Fig. 4 Transmission efficiency of TE_{01} mode vs frequency

图4 TE_{01} 模传输效率随频率的变化

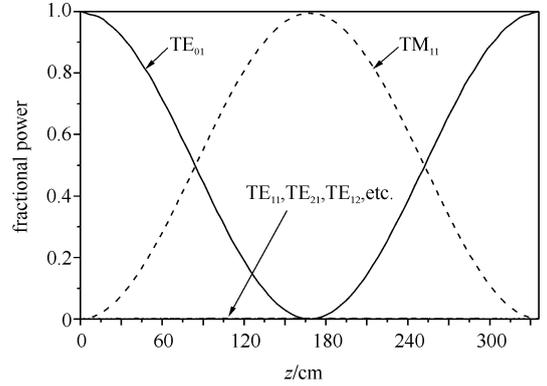
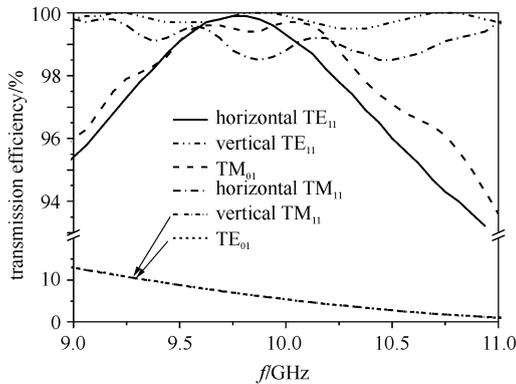


Fig. 5 Power distribution of different modes along the TE_{01} bend circular waveguide

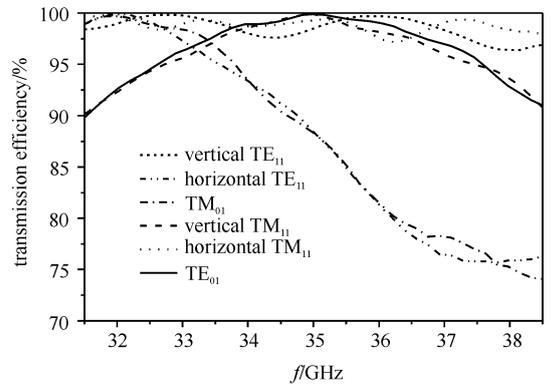
图5 TE_{01} 模弯曲波导中不同模式功率分布随波导轴线的变化

3.3 弯曲波导对其它模式传输特性的影响

前面的计算表明,优化设计的 TM_{01} 模弯曲波导实现了 TM_{01} 模的高效率传输,并未使 TM_{01} 模转化为水平极化 TE_{11} 模。根据线性微波系统的可逆性,可以预测,若在该波导内输入水平极化 TE_{11} 模,在输出口它也不会转换为 TM_{01} 模,因此水平极化 TE_{11} 模在该波导中也应有较高的传输效率,这一点从式(2)~(7)中两个模式对应各量的对称性可以看出。也就是说,优化设计的 TM_{01} 模弯曲波导同样可以实现水平极化 TE_{11} 模的高效率传输。同理,垂直极化 TM_{11} 模同样可以在优化设计的 TE_{01} 模弯曲波导中高效率传输。



(a) TM_{01} bend waveguide($a=2.20$ cm, $R=53.00$ cm)



(b) TE_{01} bend waveguide($a=1.477$ cm, $R=213.71$ cm)

Fig. 6 Transmission efficiencies of some special modes vs frequency

图6 弯曲波导对一些常用模式的传输效率

图6(a)为 $a=2.2$ cm, $R=53.00$ cm的 TM_{01} 模弯曲波导对一些常用模式的传输效率,可以看到:(1)与理论分析和设计一致, TM_{01} 模、水平极化 TE_{11} 模在中心频率上具有较高的传输效率(TM_{01} 模为99.7%,水平极化 TE_{11} 模为99.3%),偏离中心频率时传输效率下降,两者具有相似的频带特性;(2) TE_{01} 模和垂直极化 TM_{11} 模由于易于发生相互耦合,在一般的弯曲波导中传输效率不高(因为本弯曲波导是针对 TM_{01} 模的传输设计的);(3)垂直极化 TE_{11} 模、水平极化 TM_{11} 模因为不易和其它模式耦合,具有较高的传输效率(在9~11 GHz内传输效率大于98%),且随频率变化不敏感。总之,优化设计的 TM_{01} 模弯曲波导可用于 TM_{01} 模、 TE_{11} 模和水平极化 TM_{11} 模的高效率传输,而不能保证 TE_{01} 模和垂直极化 TM_{11} 模的高效传输。

图6(b)为 $a=1.477$ cm, $R=213.71$ cm的 TE_{01} 模弯曲波导对一些常用模式的传输效率,可以看到:(1) TE_{01} 模和垂直极化 TM_{11} 模在中心频率上的传输效率均达到了99.9%,且两者的频带特性相似;(2)易于相互

耦合的 TM_{01} 模和水平极化 TE_{11} 模在其中传输效率不高; (3) 垂直极化 TE_{11} 模、水平极化 TM_{11} 模在其中也有较高的传输效率(在 31.5~38.5 GHz 内传输效率大于 97%)。总之, 优化设计的 TE_{01} 模弯曲波导可用于 TE_{01} 模、 TM_{11} 模和垂直极化 TE_{11} 模的高效传输。

4 结 论

根据耦合波方程导出了可高效传输 TM_{01} 、 TE_{01} 模式的过模弯曲圆波导设计方程(这两个设计方程也同时适用于传输水平极化 TE_{11} 模和垂直极化 TM_{11} 模的弯曲波导的设计), 并进行了实例研究。结果表明, 若弯曲角度已定, 通过选择适当的波导半径 a 和弯曲半径 R 可设计出性能优良的弯曲波导。设计实例表明: (1) 所设计的 TM_{01} 模弯曲波导和 TE_{01} 模弯曲波导在中心频率上的传输效率均超过 99.5%, 传输效率大于 95% 的带宽分别为 20.0% 和 14.4%; (2) 上述两个弯曲波导在分别传输 TE_{11} 模和 TM_{11} 模时也具有较高的传输效率; (3) 通过弯曲波导传输时, 水平极化 TE_{11} 模与 TM_{01} 模有相似的传输效率和频带特性, 垂直极化 TM_{11} 模与 TE_{01} 模有相似的传输效率和频带特性; (4) 垂直极化 TE_{11} 模、水平极化 TM_{11} 模由于不易和其它模式耦合, 在弯曲波导内通常有较高的传输效率, 且传输效率随频率变化不敏感。

为了能够更加清楚地认识波导弯曲对模式传输的影响, 文中在计算传输效率时没有考虑波导的损耗。若考虑波导损耗, 假设波导材料为铜(导电率为 5.8×10^7 S/m), 则上述设计实例中, TM_{01} 模弯曲波导在中心频率上的传输效率为 99.1%, TE_{01} 模弯曲波导在中心频率上的传输效率为 97.5%。

参考文献:

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies[M]. New York: IEEE Press, 2001.
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2006.
- [3] Lawson W, Arjona M R, Hogan B P, et al. The design of serpentine-mode converters for high-power microwave applications[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, 2000, **48**(5): 809-814.
- [4] Li Hongfu, Thumm M. Mode conversion due to curvature in corrugated waveguides[J]. *Int J Electronics*, 1991, **71**(2): 333-347.
- [5] 杨仕文. 高功率微波高频系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 1997. (Yang Shiwen. Studies of the high-power microwave RF systems. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 1997)
- [6] 张玉文, 舒挺, 袁成卫. 组合型 TM_{01} - TE_{11} 弯形圆波导模式转换器研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(1): 117-120. (Zhang Yuwen, Shu Ting, Yuan Chengwei. Study on a combined TM_{01} - TE_{11} mode converter of bent circular waveguides. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1): 117-120)
- [7] 张玉文, 舒挺, 袁成卫. TM_{01} - TE_{11} 弯形圆波导模式转换器的优化设计[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 591-594. (Zhang Yuwen, Shu Ting, Yuan Chengwei. Optimization design of the bent circular waveguide TM_{01} - TE_{11} mode converter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 591-594)
- [8] Yang Shiwen, Li Hongfu. Optimization of novel high-power millimeter-wave TM_{01} - TE_{11} mode converter[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Tech*, 1997, **45**(4): 552-554.
- [9] Yuan Chengwei, Zhong Huihuang, Qian Baoliang. Design of tri-bend TM_{01} - TE_{11} mode converter with input-output aligned on the same axis [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1864-1868.
- [10] 顾茂章, 张克潜. 微波技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. (Gu Maozhang, Zhang Keqian. Microwave technology. Beijing: Tsinghua University Press, 1989)

Design of bend circular waveguides for high-power microwave applications

Yuan Chengwei, Zhong Huihuang, Qian Baoliang

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The design methodology and numerical results for two bend circular waveguides(BCWGs) suitable for transmitting TM_{01} mode and TE_{01} mode, respectively, were reported. The optimized TM_{01} mode BCWG and TE_{01} mode BCWG both have a transmission efficiency of over 99.5% at center frequency with separate bandwidth of 20.0% and 14.4%. Moreover, the two BCWGs are also suitable for transmitting TE_{11} mode and TM_{11} mode, respectively. The transmission characteristics of horizontal polarized TE_{11} mode and vertical polarized TM_{11} mode are similar with those of TM_{01} mode and TE_{01} mode, respectively. Vertical polarized TE_{11} mode and horizontal polarized TM_{11} usually have high transmission efficiencies through BCWGs, since they are unlikely to couple with other modes.

Key words: high-power microwave; overmoded circular waveguide; transmission line; mode coupling theory