

# 同轴插板式 TEM—TE<sub>11</sub> 模式转换器的设计与实验研究\*

刘庆想<sup>1</sup>, 袁成卫<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 理学院, 四川 成都 610031; 2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 介绍了同轴插板式 TEM—TE<sub>11</sub> 模式转换器的设计: 在同轴波导内沿径向插入四块金属板, 将同轴 TEM 模转变为扇形截面波导 TE<sub>11</sub> 模, 通过控制插板的长度使不同扇形截面波导输出 TE<sub>11</sub> 模的相位不同, 最后在圆波导内形成 TE<sub>11</sub> 模; 通过在插板的前端设置角向均匀分布的金属杆, 实现了模式转换器的良好匹配。实验测得模式转换器的辐射方向图轴向最大, 与数值计算结果吻合良好, 表明实验中模式转换器的输出模式与数值计算结果一致, 从而验证了同轴插板式模式转换器的可行性。

**关键词:** 模式变换器; 高功率微波; 同轴波导; 圆波导  
**中图分类号:** TN811; TN814 **文献标识码:** A

为了实现高功率微波源输出同轴 TEM 模(或 TM<sub>01</sub> 模)的定向辐射, 通常要将同轴 TEM 模和 TM<sub>01</sub> 模转换为具有轴向辐射最大值的圆波导 TE<sub>11</sub> 模。当前, 被广泛采用的高功率微波模式变换器是 S 形模式变换器<sup>[1,2]</sup>。S 形模式转换器虽然可以高效地实现圆波导 TM<sub>01</sub>—TE<sub>11</sub> 模式转换, 但因其有波导弯曲结构, 给加工带来困难, 同时也存在输入输出不共轴等问题, 影响了整个辐射系统的紧凑性。文献[3]给出了一种同轴插板式模式转换器, 通过在同轴波导内插入长度不等的金属板, 实现了同轴 TEM 到圆波导 TE<sub>11</sub> 的模式变换。该模式转换器具有输入输出共轴、尺寸短、容易实现等优点。文献[3]初步设计了一个中心频率为 3.8 GHz 的模式转换器, 并进行了数值计算, 本文将进一步介绍该模式转换器的设计以及最近的实验测试结果。

## 1 模式转换器的基本原理和设计

### 1.1 基本原理

模式转换器的基本结构如图 1 所示, 其设计思想为<sup>[3]</sup>: 在同轴波导内沿径向插入几块金属板, 将同轴波导分为几个扇形截面波导, 同轴波导中的 TEM 模被转变为扇形截面波导中的 TE<sub>11</sub> 模式。图中 C 段的上部为一个 180° 扇形截面波导, 下部为两个 90° 扇形截面波导, 上下两部分波导里面传输 TE<sub>11</sub> 模的相速不同, 当金属板 1 和 2 的长度满足关系式(1)时, D 段上下两个扇形截面波导中的 TE<sub>11</sub> 模具有 180° 相差, 即在同一时刻两个波导中传输的 TE<sub>11</sub> 模极化方向一致。在 E 段微波模式变为同轴 TE<sub>11</sub> 模, 在 F 段微波模式转变为圆波导 TE<sub>11</sub> 模。其中式(1)为

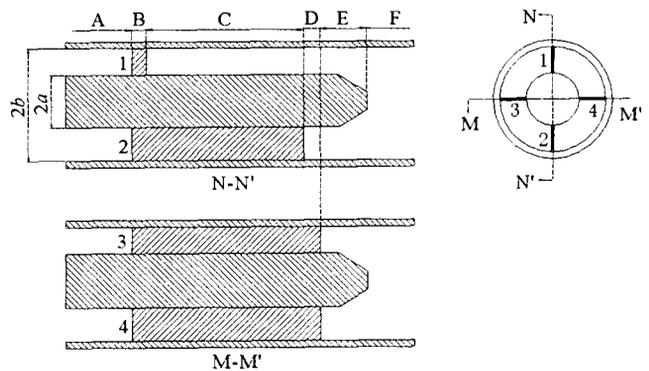


Fig. 1 Structure of the novel mode converter  
图 1 新型模式变换器结构示意图

$$L_2 - L_1 = \frac{\pi}{k_1 - k_2} \quad (1)$$

式中:  $L_1, L_2$  分别表示金属板 1 和 2 的长度;  $k_1, k_2$  分别表示 180° 和 90° 扇形截面波导中 TE<sub>11</sub> 模的传播常数。

### 1.2 基本结构设计

模式转换器的基本结构参数包括: 同轴波导内外导体半径、金属插板的厚度和长度以及末端锥体的尺寸

\* 收稿日期: 2005-01-13; 修订日期: 2005-05-20

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 袁成卫(1974—), 男, 博士生, 主要从事高功率微波模式转换和天线研究; E-mail: ehfz\_ycw@163.com。

等。同轴结构内外导体的设计一般依据实际需要进行,如根据微波源输出尺寸进行设计,另外还要满足扇形截面波导中的单模传输条件<sup>[3]</sup>。金属板的厚度不需太厚,以适合加工和装配为原则,太厚会增加反射。金属板 1,2 的长度主要依据(1)式进行设计,金属板 3,4 的长度相等,且大于金属板 2 的长度。锥体结构的作用在于把同轴  $TE_{11}$  模转换为圆波导  $TE_{11}$  模,其尺寸只影响模式转换器的反射。按照上述设计思想,设计了一个中心频率为 3.8 GHz 的模式转换器,其基本参数为:同轴波导内导体半径  $a=2$  cm,外导体内径为  $b=4.5$  cm,金属插板厚度 0.2 cm,四个金属插板的长度分别为: $L_1=0.3$  cm, $L_2=12.8$  cm, $L_3=L_4=14$  cm。内导体末端锥体的尺寸为  $\phi 1$  cm  $\times$  3.5 cm。

### 1.3 匹配结构设计

对按照上述参数设计的模式转换器进行数值计算,发现在输入端口有较大的 TEM 模反射,这是由于在同轴波导内插入金属板所造成的。为了实现输入端的匹配以消除 TEM 模反射,必须在输入端同轴波导内设置适当的匹配结构,达到消除反射的目的。文献[4]分析指出,在传输 TEM 模的同轴波导内引入一定数目的金属支撑杆可以产生一定的 TEM 模反射,又不激励起其它可传输模式。采用文献[4]中的算法,通过计算发现在金属插板前的适当位置设置四根截面为 2 mm  $\times$  2 mm、沿角向均匀分的金属杆可以使反射达到最小。图 2 给出了反射系数随金属匹配杆位置的变化关系,可以看到当匹配杆位于金属插板前沿 2.3 cm 时,反射系数达到最小值 0.07。

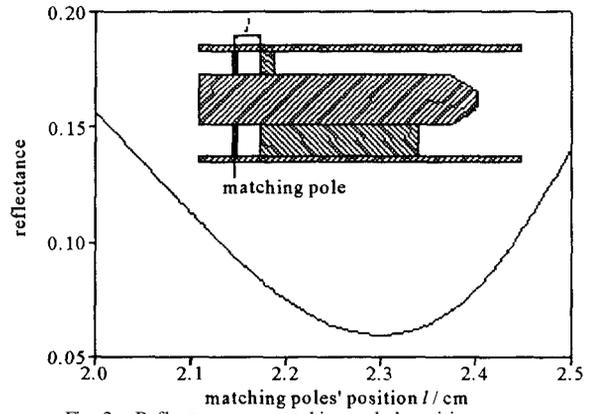


Fig. 2 Reflectance vs matching poles' position  
图 2 匹配杆距金属板前沿的距离与反射系数的关系

## 2 模式转换器的数值计算结果

用有限元程序对上述结构进行了数值计算,模式转换器的转换效率与频率的关系如图 3 所示,可以看到,输出模式有三种: $TE_{11}$ ,  $TM_{01}$  和  $TE_{21}$ , 在中心频率上  $TE_{11}$  模的转换效率为 98.5%,在 3.62 ~ 4.01 GHz 的频率范围内  $TE_{11}$  转换效率大于 90%,带宽超过 10%;反射系数与频率的关系如图 4 所示,中心频率上反射系数约为 -22 dB,在 3.6 ~ 4.0 GHz 的频率范围内反射系数小于 -13 dB。

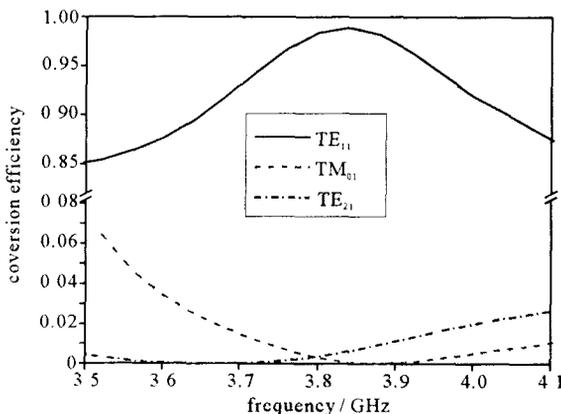


Fig. 3 Conversion efficiency of the mode converter  
图 3 模式转换器的转换效率

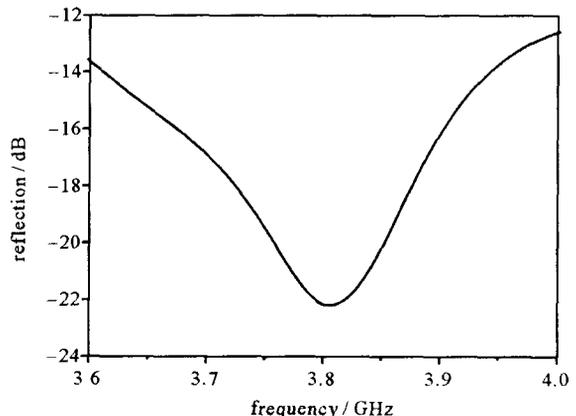


Fig. 4 Reflection of the mode converter  
图 4 模式转换器的反射系数

## 3 模式转换器的实验测试

模式转换器的输出圆波导在工作频段处于过模状态,既可以传播  $TE_{11}$  模又可以传播  $TM_{01}$ ,  $TE_{21}$  等模式,要直接测量输出微波的模式和各模式所占的比例是一项困难的工作,因为在波导内引入任何一种测量装置,都有可能改变波导中的模式分布。在测量高功率微波源输出模式时通常采用测量辐射场分布的方法<sup>[5]</sup>, G S Ling<sup>[6]</sup>, H Kumric<sup>[7]</sup>, J L Doane<sup>[8]</sup> 等人在测量转换器输出模式时也采用了测量辐射场分布的方法。尽管通

过测量模式转换器输出模式的辐射场不能准确地得到出口微波的模式和大小,但可以将其与理论计算辐射场进行比较,若两者一致,则可以验证理论计算的正确性,从而确定理论计算结果的可信度。

这里我们也采用测量辐射场分布的方法验证模式转换器的输出模式,模式转换器辐射方向图的测量是在 22 m × 15 m × 8 m 的微波暗室中进行的,天线测试仪为 HP8530c。图 5(a), (b) 分别为实验测试的 H 面辐射方向图和 E 面辐射方向图,从图中可以看到辐射场在轴向上最大,具有 TE<sub>11</sub> 模辐射场的特征,因而可以判定输出模式主要为 TE<sub>11</sub> 模。图 5(c), (d) 分别为数值计算的 H 面辐射方向图和 E 面辐射方向图。将实验测试结果与数值计算结果对比,可以看到两者吻合良好,表明实验中模式转换器的输出模式与数值计算中的输出模式基本一致,另一方面也证明了数值计算结果的可靠性。

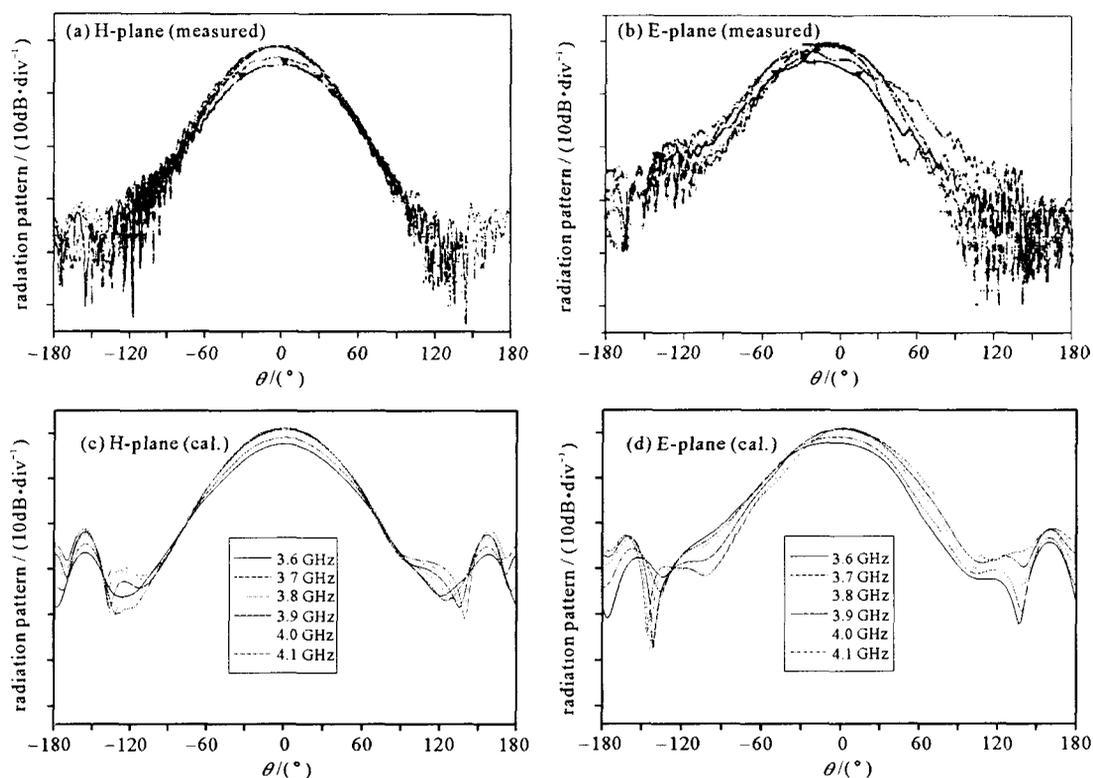


Fig. 5 The measured results and the calculated results

图 5 实验测量辐射方向图和数值计算辐射方向图的对比

## 4 结论

本文在文献[3]的基础上进一步介绍了同轴插板式模式转换器的设计和实验测试结果。实验测量结果表明:模式转换器的辐射方向图在轴向最大,输出模式主要为 TE<sub>11</sub> 模。模式转换器的测量方向图和数值计算方向图有较好的一致性,表明实验测量时模式转换器的输出模式和数值计算的输出模式基本一致,验证了数值计算结果的可靠性。实验结果证明了采用同轴插板的方法设计模式转换器的可行性,为高功率微波模式转换器和天线设计提供了一种新的思路。

## 参考文献:

- [1] Yang S W, Li H F. Numerical modeling of 8 mm TM<sub>01</sub>—TE<sub>11</sub> mode converter[J]. *Int J Infrared and Millimeter Waves*, 1996, 17(11): 1935—1943.
- [2] 牛新建,李宏福,谢仲岭. 高功率毫米波圆波导 TM<sub>01</sub>—TE<sub>11</sub> 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 waveguides TM<sub>01</sub>—TE<sub>11</sub> mode converter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(1): 90—94)
- [3] 刘庆想,袁成卫. 一种新型同轴 TEM—圆波导 TE<sub>11</sub> 模式变换器[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(11): 1421—1424. (Liu Q X, Yuan C W. A new kind of coaxial TEM—circular TE<sub>11</sub> mode converter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11): 1421—1424).
- [4] 张晓萍,钟辉煌,袁成卫. 微波源中同轴提取区支撑杆的理论分析与设计[J]. *微波学报*, 2004, 20(2): 46—50. (Zhang X P, Zhong H H,

- Yuan C W. Theoretical analysis and design of the support legs in coaxial extractor of microwave source. *Journal of Microwave*, 2004, **20** (2) :46—50)
- [5] 舒挺, 王勇, 李继建, 等. 高功率微波的远场测量[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5) :485—488. (Shu T, Wang Y, Li J J, et al. Measurement of high power microwave in the far-field zones. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5) :485—488)
- [6] Ling G S, Zhou J J. Converters for the TE<sub>11</sub> mode generation from TM<sub>01</sub> vircator at 4 GHz[J]. *Chin Phys Lett*, 2001, **18**(9) :1285—1287.
- [7] Helga K, Thumm M. Optimized overmoded TE<sub>01</sub>-to TM<sub>11</sub> mode conversion for high-power microwave application at 70 and 140 GHz[J]. *Int J Infrared and Millimeter Waves*, 1986, **7**(10) :1139—1463.
- [8] Doane J L. Mode converters for generating the HE<sub>11</sub> mode from TE<sub>01</sub> in a circular waveguide[J]. *Int J Electronics*, 1982, **53**(6) :573—585.

## Design and experiment study of coaxial fin-inserted TEM—TE<sub>11</sub> mode converter

LIU Qing-xiang<sup>1</sup>, YUAN Cheng-wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

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

**Abstract:** The design and the measurements of the coaxial fin-inserted mode converter are presented. It is shown that with four metal fins inserted in the coaxial waveguide, the TEM mode is converted to coaxial TE<sub>11</sub> mode and outputted with different phases, and finally, it forms a TE<sub>11</sub> conventional circular waveguide mode. Moreover, four matching metal poles were designed to compensate for the reflection from inserted fins. The measured radiation patterns of the mode converter agree well with the calculated results, which indicate that the output modes of the mode converter are the same as the simulated results. The experiment demonstrates the feasibility of the coaxial fin-inserted mode converter.

**Key words:** Mode converter; High power microwave; Coaxial waveguide; Circular waveguide