

文章编号: 2095-4980(2016)05-0677-04

太赫兹波导传输中的模式稳定性

甘雨辰, 傅文杰, 陈 驰*

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要: 太赫兹波在基模波导中传输的欧姆损耗很大, 因此在传输太赫兹波时经常采用过模传输的方式来降低传输损耗。但采用过模传输, 会引起波导中传输模式的变化, 因此如何保证传输中的模式稳定是过模传输中的重要问题。本文采用仿真与实验的方法, 对 220 GHz 圆传输波导中的圆波导半径渐变情况下的模式稳定性进行了研究。结果表明, 适当延长渐变波导长度, 可以抑制模式耦合, 保持单模传输。

关键词: 太赫兹波导传输; 模式稳定性; 过模传输; 模式变换

中图分类号: TN814

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0677

Mode stability of terahertz waveguide transmission

GAN Yuchen, FU Wenjie, CHEN Chi*

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: Because of the huge ohmic losses of the fundamental mode waveguide in terahertz wave, over-mode transmission line is often adopted to reduce the transmission loss. Nevertheless, the waveguide mode would be changed by using over-mode transmission line. How to ensure the stability of the mode is an important issue. By using simulation and experimental methods, the stability of the circular waveguide at 220 GHz is researched. The results show that prolonging taper waveguide properly can inhibit the mode change and maintain single mode.

Key words: terahertz waveguide transmission; mode stability; over-mode transmission; mode change

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1 THz~10 THz 范围内的电磁波。近些年来, 太赫兹科学技术随着其产生机理方面、技术检测方面及应用技术方面的进步而得到了飞速发展^[1]。太赫兹科学技术的应用需要太赫兹辐射源和太赫兹探测技术的发展, 同时也离不开各种太赫兹功能器件的进一步完善^[2-3]。波导是一种重要的电磁波传输线, 一般工作在基模。在微波与毫米波波段基模波导具有高功率与低损耗的特性^[4], 但在太赫兹波段, 基模波导加工困难且欧姆损耗大。因此, 通过采用低损耗的高阶模式进行过模传输成为一种可能的尝试。采用过模传输, 就需要过渡波导将太赫兹波从基模波导传输到过模波导中。由于在过渡波导中能够存在多个模式, 且存在结构不均匀性(如圆-圆过渡波导中的半径渐变), 因此容易发生模式耦合, 所以在进行波导尺寸形状变换时必须考虑模式间的耦合^[5-6], 防止激励起杂模, 导致模式不纯。本文研究了在波导尺寸由小变大的情况下可能引起的模式不稳定性及其原理, 并对此进行了数值模拟、仿真以及实验。

1 波导传输线耦合波理论

波导中的不均匀性(如圆波导半径的渐变、圆波导轴线的弯曲)都会引起波导中各传播模式的能量耦合, 从而产生模式间的耦合^[7]。基于耦合波理论的耦合波方程是研究波导模式变换的基本方程^[8], 半径渐变圆波导模式变换的基本方程为^[9]:

$$\frac{dA_{mn}^+}{dz} = -\frac{1}{2} \frac{d(\ln \gamma_{mn'})}{dz} A_{mn}^- - \gamma_{mn'} A_{mn}^+ + A_{mn}^- \sum_{+mm} C_{(mn')(mm)}^+ A_{mn}^+ + \sum_{-mm} C_{(mn')(mn)}^- A_{mn}^- \quad (1)$$

收稿日期: 2014-12-22; 修回日期: 2016-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61401064); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(No.CAEP THZ201403)

*通信作者: 陈 驰 chenchi03@163.com

$$\frac{dA_{mn}^-}{dz} = -\frac{1}{2} \frac{d(\ln \gamma_{mn'})}{dz} A_{mn}^+ + \gamma_{mn'} A_{mn}^- + A_{mn}^- \sum_{+mn} C_{(mn')(mn)}^- A_{mn}^+ + \sum_{-mn} C_{(mn')(mn)}^+ A_{mn}^- \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: A_{mn}^\pm 表示正向和反向传播的 (mn) 波振幅; $C_{(m'n')(mn)}^\pm$ 表示 (mn) 波分别与同向及反向 $(m'n')$ 传播的波之间的耦合系数; $\gamma_{mn} = \alpha_{mn} + j\beta_{mn}$ 表示 (mn) 波的传播常数; α_{mn}, β_{mn} 分别为衰减和相位常数。 $C_{(m'n')(mn)}^\pm$ 具体形式可分为 4 种情形:

$$C_{[m'n'][mn]}^\pm = \frac{m^2 (R_{mn'} X_{mn}^2 \pm R_{mn} X_{mn'}^2) X_{mn}^2 X_{mn'}^2 \frac{da}{dz} \times (-1)^{n+n'}}{a (R_{mn} R_{mn'})^2 (X_{mn}^2 - m^2)^2 (X_{mn'}^2 - m^2)^2 (X_{mn'}^2 - X_{mn}^2)} \quad (3)$$

$$C_{(mn')(mn)}^\pm = \frac{m^2 (R_{mn} X_{mn'}^2 \pm R_{mn'} X_{mn}^2) \frac{da}{dz} \times (-1)^{n+n'}}{a (R_{mn} R_{mn'})^2 (X_{mn'}^2 - X_{mn}^2)} \quad (4)$$

$$C_{(mn')(mn)}^\pm = \frac{m \frac{da}{dz} (-1)^{n+n'+1}}{a (R_{mn} R_{mn'})^2 (X_{mn}^2 - m^2)^2} \quad (5)$$

$$C_{[mn'](mn)}^\pm = \frac{m \frac{da}{dz} (-1)^{n+n'+1}}{a (R_{mn} R_{mn'})^2 (X_{mn'}^2 - m^2)^2} \quad (6)$$

分别表示 $TE_{mn} \rightarrow TE_{mn'}$, $TM_{mn} \rightarrow TM_{mn'}$, $TE_{mn} \rightarrow TM_{mn'}$ 和 $TM_{mn} \rightarrow TE_{mn'}$ 耦合时的耦合系数解析表达式。式中: $R_{mn} = \beta_{mn}/k_0$; a 表示波导半径, 为 z 的函数; X_{mn} 为第 m 阶 Bessel 函数 $J_m(X_{mn})$ (对于 TM 模) 或者其导数 $J'_m(X_{mn})$ (对于 TE 模) 的第 n 个非零根值。

圆-圆过渡波导中角向结构未发生变化, 因此从耦合系数式(3)~式(6)可以看出, 对于 2 个模式, C_{mn} 与 $C_{m'n'}$ 的耦合原则需满足 $m=m'$, 而 $m \neq m'$ 情况下的模式之间不发生耦合。

2 数值计算与仿真分析

本文对 220 GHz 输入工作模式为 TE_{11} 模的不同长度的 $\phi 3.58 \sim \phi 10$ 半径渐变过渡波导进行了数值计算和仿真研究, 其几何结构如图 1 所示。

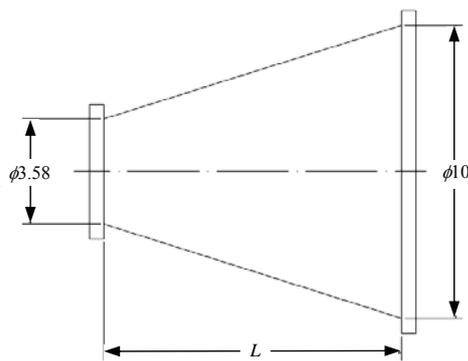


Fig.1 Structure of $\phi 3.58 \sim \phi 10$ tapered waveguide
图 1 $\phi 3.58 \sim \phi 10$ 渐变过渡波导几何结构

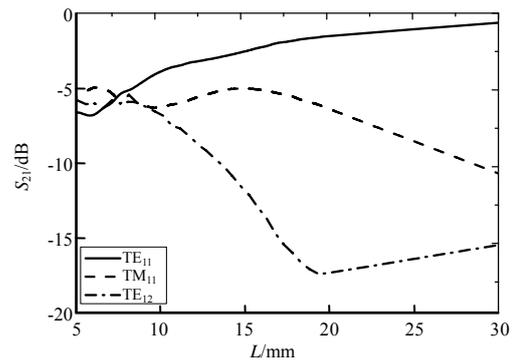


Fig.2 Numerical results of S_{21} at different lengths L
图 2 不同长度 L 下的 S_{21} 的数值计算结果

图 1 中 L 为过渡波导长度。根据式(3)~式(6)得到的耦合原则, 数值计算中仅考虑 $m=1, n=1, 2, 3, \dots$ 的 TE 模式与 TM 模式, 图 2 所示为不同 L 长度下 TE_{11} 模和 TE_{12} 模相对输出功率, 可以得到当 L 较短时 TE_{11} 模的功率大幅度减少, 而随着 L 的增大 TE_{11} 模的输出功率增大, 当 L 大于 20 mm 时 TE_{11} 占比在 75% 以上, 当 L 大于 30 mm 时 TE_{11} 占比在 90% 以上, 数值计算结果表明与 TE_{11} 模式耦合最强的是 TM_{11} 和 TE_{12} 模式。

对以上结构采用 HFSS 进行仿真, 由于 TE_{11} 是对称结构, 且轴向未有变化, 因此可采用对称结构设计简化仿真过程, 模型如图 3 所示。图 4 为高频结构仿真器 (High Frequency Structure Simulator, HFSS) 模拟的 $f=220$ GHz 时, $\phi 3.58 \sim \phi 10$ 半径渐变过渡波导, 输入端为 TE_{11} 模时, 不同长度 L 下的 S_{21} 参数曲线。在用 HFSS 仿真时, 考

虑了所有模式特别是 TM_{11} 模的情况，从 TE_{11} 和 TE_{12} 模式的曲线走向和相对大小，可以得到耦合波理论所得到的数值结果和 HFSS 软件仿真结果基本一致。

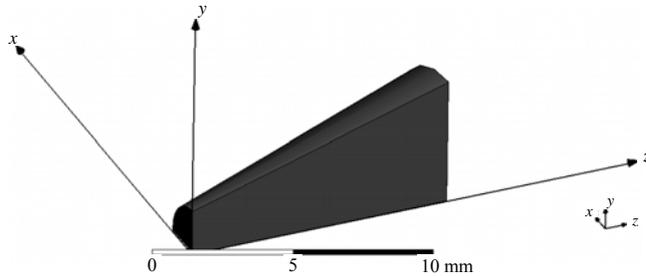


Fig.3 HFSS simulation model
图 3 HFSS 仿真模型

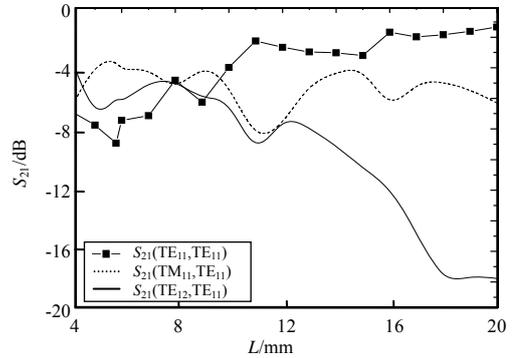


Fig.4 HFSS simulation results of S_{21} at different lengths L
图 4 不同长度 L 下 S_{21} 参数的 HFSS 仿真结果

图 5 为 220 GHz，不同长度 L 下，输入端为 TE_{11} 模时，输出端的电场图。由图 5 可以看出随着长度 L 的增加，输出端模式的纯度增加， TE_{11} 的相对功率增大，杂模的占比减小。

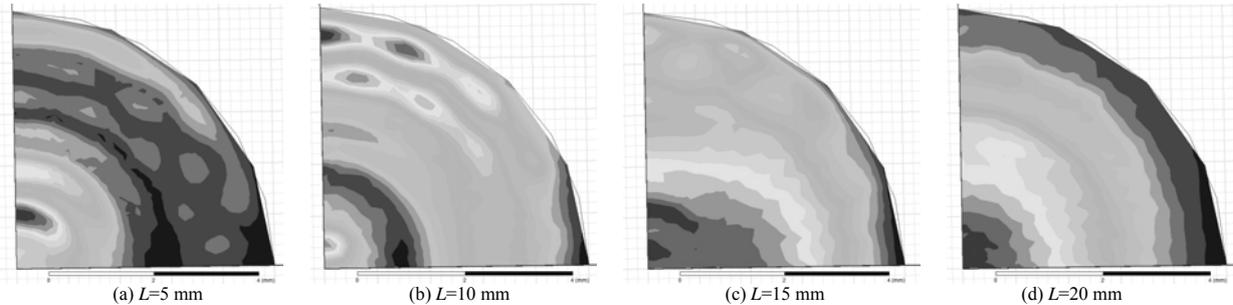


Fig.5 Electric field distribution in output port
图 5 输出端电场分布图

3 实验研究

为了验证理论与仿真结果，进行了验证性实验研究，实验系统框图如图 6 所示。实验中，先将 220 GHz 固态源输出的矩形 TE_{10} 模式转化为直径为 3.58 的圆 TE_{11} 模式，然后用该圆 TE_{11} 模式激励长度为 5 mm 的 $\phi 3.58-\phi 10$ 过渡波导，在输出端使用具有小尺寸(WR5 矩形波导)接头的 PM4 功率来回扫描成像，PM4 探头及扫描路径如图 6 所示。

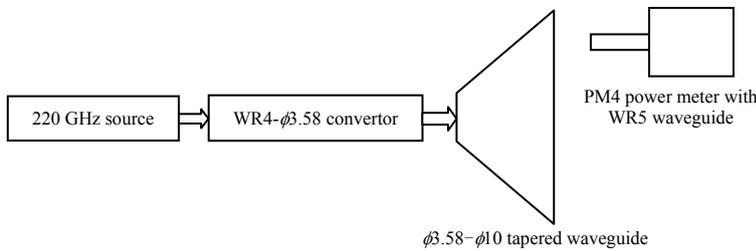
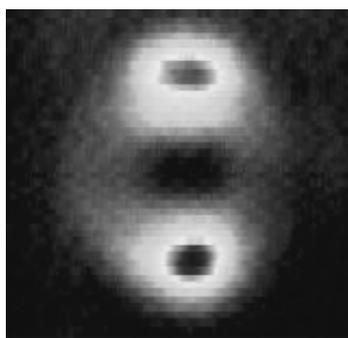


Fig.6 Scanning system for electric field distribution
图 6 电场分布扫描系统



Fig.7 Experimental sample of tapered waveguide
图 7 过渡波导实验样品

当 $f=220$ GHz 时，矩形 TE_{01} 模式和 TE_{20} 模式在 WR5 波导中截止，所以只采集到电场矢量方向垂直于 WR5 波导宽边的电场分布。考虑到圆波导中 TE_{11} 模式的电场矢量方向与输入端矩形波导 TE_{10} 模式的电场矢量方向相同，因此，接收波导与输入矩形波导保持水平放置。实验样品如图 7 所示，不同长度样品输出测试场分布如图 8 所示。从图 8 可以看出，实验所得的电场分布与 HFSS 仿真得到的电场分布相吻合。

(a) output electric field distribution at $L=5$ mm(b) output electric field distribution at $L=20$ mmFig.8 Output electric field distribution of $\phi 3.58-\phi 10$ tapered waveguide图8 $\phi 3.58\sim\phi 10$ 过渡波导输出端电场分布

4 结论

本文详细介绍了半径渐变情况下圆-圆过渡波导可能存在的模式竞争问题。通过理论分析、数值仿真以及实验确认,当过渡段长度过短时, TE_{11} 会激励起其他模式,导致模式不纯。适当延长 L 能够抑制 TE_{11} 耦合到其他模式,特别是 TM_{11} 和 TE_{12} ,从而保证模式纯度,保证单模传输,为下一步的模式变换和低损耗传输奠定了基础。

参考文献:

- [1] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(5):481-486.)
- [2] KORV C, READ M, BOOSKE J, et al. 650 GHz traveling wave tube amplifier[C]// 2008 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Pasadena, California, USA: [s.n.], 2008:1-2.
- [3] 孔德鹏,苗竟,陈琦,等. 太赫兹纤维波导研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(6):792-797. (KONG Depeng, MIAO Jing, CHEN Qi, et al. Research progress of terahertz fiber waveguide[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(6):792-797.)
- [4] NANNI E A, JAWLA S K, SHAPIRO M A, et al. Low-loss transmission lines for high-power terahertz radiation[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2012,33(7):695-714.
- [5] 杜人波,罗勇,牛新建. 高功率毫米波圆波导半径微扰模式变换器的优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2008,20(1):99-102. (DU Renbo, LUO Yong, NIU Xinjian. Design of high-power millimeter wave corrugated circular waveguide mode converter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008,20(1):99-102.)
- [6] 童帆,刘长军. 一种基于过模波导的高功率 8 mm 微波传输系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):416-419. (TONG Fan, LIU Changjun. Design of a high-power 8 mm microwave transmission system based on over-moded waveguide[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):416-419.)
- [7] 于新华. 高功率微波传输线及模式变换研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010. (YU Xinhua. Study of key techniques on high-power millimeter wave mode conversion and transmission[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.)
- [8] 黄宏嘉. 微波原理(卷 I)[M]. 北京:科学出版社, 1964. (HUANG Hongjia. Microwave Principles(Vol.1)[M]. Beijing: Science Press, 1964.)
- [9] LI H F, THUMM M. Mode coupling in corrugated waveguides with wall impedance diameter change[J]. International Journal of Electronics, 1991,71(5):827-844.

作者简介:



甘雨辰(1993-),女,成都市人,在读硕士研究生,主要从事毫米波研究,email:1522340869@qq.com

傅文杰(1981-),男,成都市人,副教授,主要从事毫米波与太赫兹波研究。

陈 驰(1990-),男,成都市人,在读博士研究生,主要从事太赫兹传输线研究。