

文章编号: 2095-4980(2018)04-0584-04

低损耗波纹波导的传输特性

陈 驰, 赵 虹, 傅文杰, 鄢 扬

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 为了降低太赫兹波传输的损耗, 研究了波纹波导中传输太赫兹波时的损耗特性, 得到波纹波导的衰减常数的理论计算公式, 在数值计算基础上设计了 220 GHz 低损耗波纹波导, 并通过电磁仿真对数值计算结果进行验证, HE₁₁ 模式实现了仿真与理论结果的相互吻合。

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: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0584

Low-loss corrugated waveguide transmission characteristics

CHEN Chi, ZHAO Hong, FU Wenjie, YAN Yang

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

Abstract: In order to reduce the loss of terahertz wave transmission, the loss characteristic of electromagnetic wave in corrugated waveguide has been studied. The calculation formula of attenuation constant for corrugated waveguide is obtained. Based on the numerical calculation, a low loss corrugated waveguide working at 220 GHz is designed, and the numerical results are verified by electromagnetic simulation. It is indicated that the theoretical result and simulation result agree well in HE₁₁ mode.

Keywords: terahertz guided transmission; mode stability; over-mode transmission; mode transformation

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 近年来, 太赫兹科学技术随着其产生机理、检测及应用技术等方面的进步得到了飞速发展, 全世界范围内已经形成了太赫兹科学技术的研究热潮。由于太赫兹频率较高, 在自由空间以及大部分基模传输线中的损耗很大, 因而如何在传输线中低损耗地传输太赫兹波已经成为太赫兹技术能否被广泛应用的关键^[1-2]。研究表明, 波纹波导中传输的主模 HE₁₁ 模式具有欧姆损耗小、极化方向性好等优点^[3-4], 能有效降低太赫兹波的传输损耗, 增加传输距离。目前, 波纹波导已用在国际热核聚变实验堆计划的 MW 级 170 GHz 传输线中^[5]。本文对波纹波导传输损耗的影响因素进行了研究分析, 并设计了能低损耗传输 220 GHz 波的过模金属波纹波导。

1 波纹波导欧姆损耗理论

波纹波导的结构见图 1, 其结构是在普通圆柱波导内壁开有平行的矩形槽构成波纹状, 这种独特的边界条件将改变电磁场在圆柱波导中的传输状态^[6]。

对于波纹波导, 在 $r=a$ 的位置, 电场 $\mathbf{E} \rightarrow 0$; 在波纹内部即 $a < r < a+d$ 的范围内形成驻波场; 在波纹波导的边界 $r=a+d$ 处有 $E_z = 0$, \mathbf{H}_ϕ (是角坐标系下磁场) 具有最大值。根据这些条件可以得到波纹波导 z 方向的壁阻抗 Z_z ^[7-9]:

$$Z_z = \frac{E_z(r=a)}{H_\phi(r=a)} = Z_0 \tan(kd) \quad (1)$$

式中: k 为波数; Z_0 为波导特征阻抗, 由波纹宽度决定:

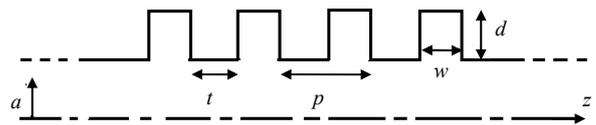


Fig.1 Schematic diagram of corrugated waveguide
图 1 波纹波导结构示意图

$$Z_0 = -j \frac{p-w}{p} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (2)$$

式中: μ_0 为自由空间磁导率; ε_0 为自由空间介电常数。

当波纹深度 $d = \lambda/4$ (λ 为波长) 时, $Z_z = \infty$, 而 $\mathbf{H}_\varphi(r=a) = 0$, 对于横向电场而言, 则有电场角向分量 $\mathbf{E}_\varphi(r=a) = 0, \mathbf{E}_r(r=a) = 0$ 。因此可得到^[10]:

$$\mathbf{E}_x = A \left[J_{m-1} \left(\frac{K_{m+1,n} r}{a} \right) \sin([m-1]\varphi) + \frac{\Delta X_{m+1,n}^2}{4mka} J_{m+1} \left(\frac{K_{m-1,n} r}{a} \right) \sin([m+1]\varphi) \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_y = A \left[J_{m-1} \left(\frac{K_{m-1,n} r}{a} \right) \cos([m-1]\varphi) - \frac{\Delta X_{m+1,n}^2}{4mka} J_{m+1} \left(\frac{K_{m-1,n} r}{a} \right) \cos([m+1]\varphi) \right] \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_z = -jA \frac{X_{m-1,n}}{ka} J_m \left(\frac{K_{m-1,n} r}{a} \right) \sin(m\varphi) \quad (5)$$

式中: A 为电场幅度; X_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数的第 n 个根; φ 为球坐标系下的角度; J_{m-1} 为 $m-1$ 阶贝塞尔函数。 K_{mn} 被定义为:

$$K_{mn} = X_{mn} \left(1 - \frac{\Sigma}{2ka} \right) \quad (6)$$

式中: Σ 为波数系数; Δ 是由波纹波导参数所决定的函数。 Σ 与 Δ 成正比:

$$\Delta = -\frac{w_1 + w_2}{w_1} \frac{1 + \frac{2 \tan(kd)}{ka}}{\tan kd} \quad (7)$$

本文只考虑波纹深度 $d = \lambda/4$ 的情况, 则有 $kd = \pi/2$, 由式(7)可得: $\Delta = \Sigma = 0$, 因此有 $K_{mn} = X_{mn}$ 。此外, 对于过模传输波纹波导, $ka > 1$, 因而 \mathbf{HE}_{mn} 电场分量可以简化为:

$$\mathbf{E}_x = AJ_{m-1} \left(\frac{X_{m-1,n} r}{a} \right) \sin([m-1]\varphi) \quad (8)$$

$$\mathbf{E}_y = AJ_{m-1} \left(\frac{X_{m-1,n} r}{a} \right) \sin([m-1]\varphi) \quad (9)$$

$$\mathbf{E}_z \approx 0 \quad (10)$$

由边界条件可以得到 HE 模式在波纹波导边界处的电场和磁场分量分别为:

$$\mathbf{E}(r=a, \varphi) = e_{01} = -\left(\frac{Z_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\chi_m}{ka^2} \left[\mathbf{r} \frac{1}{Z} - j\mathbf{z} \right] \sin \varphi \quad (11)$$

$$\mathbf{H}(r=a, \varphi) = h_{01} = -\left(\frac{1}{\pi Z_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\chi_m}{ka^2} \left[\boldsymbol{\varphi} \frac{\sin \varphi}{Z} - j\cos \varphi \mathbf{z} \right] \sin \varphi \quad (12)$$

式中: $\mathbf{r}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{z}$ 分别为 r, φ, z 方向上的单位向量; $Z = (w/p) \tan(kd)$ 为波纹波导的表面近似阻抗, k 为波数即 $k = 2\pi/\lambda$; Z_0 是自由空间阻抗; $\chi_m = \chi_{01}(1 - 1/2kaZ)$ 。可以计算出波纹波导的衰减常数为:

$$\alpha = \frac{R_s}{2Z_0} \frac{\chi_m^2}{k^2 a^3} \left[\frac{1 - \frac{t}{p} \sin^2(kd) + \frac{d}{p} + \frac{1}{kp} \sin(kd) \cos(kd)}{(1 - t/p)^2 \sin^2(kd)} + 1 \right] \quad (13)$$

式中 R_s 为波导表面电阻。

2 波纹波导损耗数值计算分析

根据波纹波导衰减理论计算式(13), 针对半径 $r=10$ mm, $d=\lambda/4=0.34$ mm, $t/w=1$ 的波纹波导结构, 采用 Matlab 编程进行数值计算分析, 得到波导衰减与波纹周期 p 随频率的变化关系曲线, 见图 2。

图 2 中的实线表示波纹周期 p 取 $\lambda/4$, 即 0.226 mm 时, 波导衰减随频率的变化情况, 可看到衰减随频率的增加先减小后增大, 在 230 GHz 附近有衰减极小值点。图中虚线和点状线则分别为波纹周期 p 取 $\lambda/3$, 即 0.453 mm

与 $\lambda/2$ 即 0.68 mm 时对应的关系曲线, 它们的衰减规律与 $\lambda/4$ 取值情况相似, 都是先减后增, 但通过比较可以发现, 随着波纹周期 p 的增大, 一方面对应的衰减极小值越偏离设计的工作频率, 但另一方面能维持较低衰减的频率范围相应会变宽。这是由于增大波纹周期, 其对应最小衰减频率的波导波长变短, 衰减极小值提高; 另一方面, 随着波纹周期的提高, 整个波导的不规整性降低, 则其维持较低衰减的频带宽带将更宽。

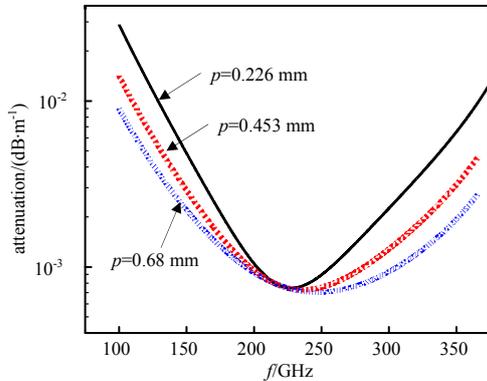


Fig.2 Relation curves between corrugation period p and transmission loss
图 2 波纹周期 p 与传输损耗关系曲线

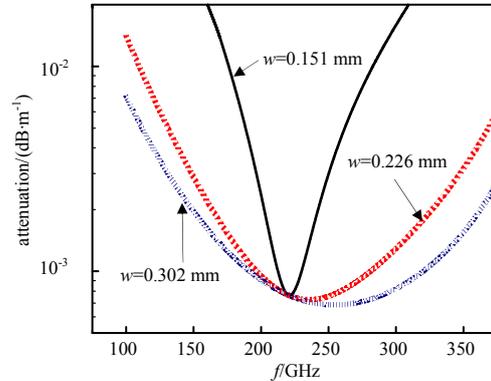


Fig.3 Relation curves between corrugation width w and transmission loss
图 3 波纹宽度 w 与传输损耗关系曲线

选取参数半径 $r=10$ mm, $d=\lambda/4=0.34$ mm, $p=\lambda/3=0.453$ mm, 计算得到波导衰减与波纹宽度 w 随频率的变化关系, 见图 3。图 3 中的实线、虚线以及点状线分别表示波纹宽度 w 取 $p/3$ 即 0.151 mm, $p/2$ 即 0.226 5 mm 以及 $2p/3$ 即 0.302 mm 时波导衰减随频率的变化情况。可看到, 与上小节中波纹周期对损耗影响规律相似, 衰减曲线随频率增加呈先减小后增大的趋势。其中前 2 种情况在 240 GHz 附近有衰减极小值点; 而对于 $2p/3$, 通过横向比较分析得到, 随着波纹宽度 w 的减小, 尽管衰减极小值对应的频率越接近设计的工作频率, 但工作带宽将会变窄, 其原理同波纹周期相似, 只不过变化更加剧烈。

根据理论计算结果, 可得到一组工作在 220 GHz 附近的低损耗波纹波导的结构参数值: 波纹波导半径 $a=10$ mm, 矩形槽深 $d=\lambda/4=0.34$ mm, 波纹周期 $p=\lambda/3=0.453$ mm, 矩形槽宽 $w=p/2=0.226 5$ mm, 槽间距 $t=w=p/2=0.226 5$ mm。

3 电磁仿真

为了验证上述理论计算参数是否能够实现在 220 GHz 附近进行低损耗传输, 采用 HFSS 建立波纹波导模型, 并进行电磁仿真。为简化计算, 提高效率, 只建立具有 6 个波纹周期的仿真模型, 并设定对称的电边界和磁边界, 构建了原波导的 1/4 来模拟整个模型特性。图 4 为波纹波导电磁仿真结构模型。

波纹波导中传输的主模 HE_{11} 模式是一种混合模式, 主要包括 TE_{11} 和 TM_{11} 2 种模式, 其中 TE_{11} 约占 86%, TM_{11} 约占 14%。因而在仿真过程中, 对激励源设定时需同时考虑这 2 种模式。2 种主要模式电场分布见图 5。

2 种模式对应的传输效率曲线见图 6。可以看到 2 种模式的 S_{21} 参数即传输效率随频率都呈现出先增后减的趋势, 且在 240 GHz 附近具有最大的传输效率, 这与之前的理论分析基本一致。

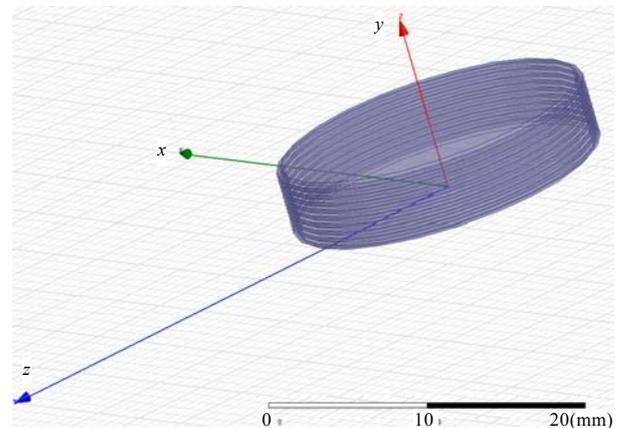
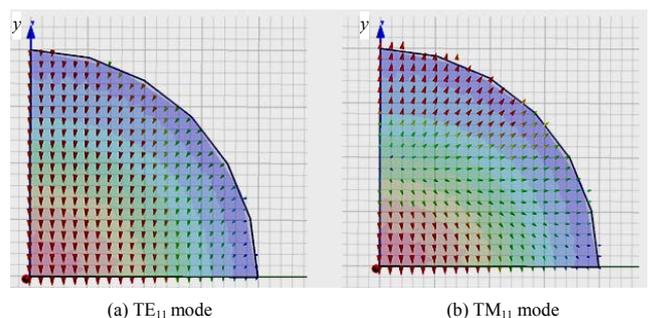


Fig.4 Electromagnetic simulation structure of corrugated waveguide
图 4 波纹波导电磁仿真结构



(a) TE_{11} mode (b) TM_{11} mode
Fig.5 Field distribution of two dominant modes of HE_{11}
图 5 HE_{11} 中 2 种主要模式的场分布

4 结论

本文推导了波纹波导的欧姆损耗理论计算式,在理论计算式的指导下,对影响波纹波导损耗的结构参数进行了数值模拟与理论分析,完成了中心工作频率为 220 GHz 的低损耗波纹金属波导结构与电磁仿真。由仿真结果可以看到,设计的结构参数在 240 GHz 附近具有损耗极小值点,这与设计要求基本一致。

参考文献:

- [1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010,22(6):703-707. (YAO Jianquan. Introduction of THz wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2010,22(6):703-707.)
- [2] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006,1(12):7-9. (LIU Shenggang. Recent development of terahertz science[J]. China Basic Science, 2006,1(12):7-9.)
- [3] CLARRICOATS P J, OLVER A D. Low attenuation in corrugated circular waveguides[J]. Electronics Letters, 1973,9(16):376-377.
- [4] THUNN M, JACOBS A, AYZA M S. Design of short high-power TE₁₁-HE₁₁ mode converters in highly overmoded corrugated waveguides[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1991,39(2):303-309.
- [5] MANSOUR R, MACPHIE R H. An improved transmission matrix formulation of cascade discontinuities and its application to E-plane circuits[J]. IEEE Trans. MTT., 1986,34(12):1490-1498.
- [6] 李宏福, THUMM M. 弯曲波纹圆波导中模式耦合系数的研究[J]. 红外与毫米波学报, 1992,11(6):486-491. (LI Hongfu, THUMM M. Study on mode coupling coefficients in curved corrugated circular waveguides[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1992,11(6):486-491.)
- [7] LI Hongfu, THUMM M. Mode coupling in corrugated waveguides with varying wall impedance diameter change[J]. International Journal of Electronics, 1991,71(5):827-844.
- [8] 钟哲夫. 伏拉索夫天线在高功率微波发射中的应用[J]. 电子科技大学学报, 1993,22(8):134-138. (ZHONG Zhefu. Application of Vlasov antenna in high power microwave emission[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1993,22(8):134-138.)
- [9] 李浩. 高功率微波高斯馈源的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2003. (LI Hao. Research on high power microwave Gaussian source[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2003.)
- [10] 谢处方. 电磁场与电磁波[M]. 北京:人民教育出版社, 1979. (XIE Chufang. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Beijing: People's Education Press, 1979.)

作者简介:



陈 驰(1990-), 男, 四川省内江市人, 在读博士研究生, 主要从事太赫兹传输线方向的研究工作. email: chenchi03@163.com.

赵 虹(1991-), 女, 山西省朔州市人, 在读硕士研究生, 主要从事微波等离子体的研究工作。

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。

鄢 扬(1965-), 男, 成都市人, 教授, 博士生导师, 主要从事等离子体电子学、高功率微波和 THz 技术研究。

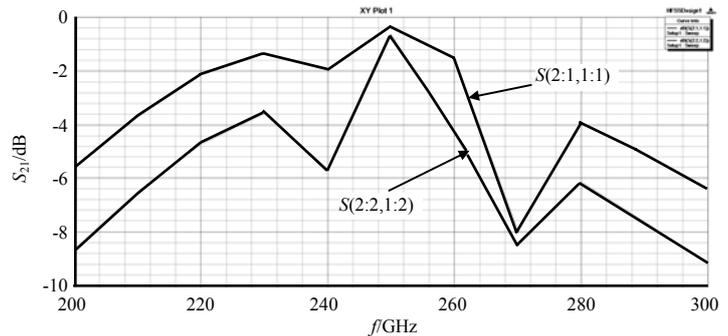


Fig.6 Transmission efficiency curves of TE₁₁ and TM₁₁ in corrugated waveguide
图 6 波纹波导中 TE₁₁ 与 TM₁₁ 传输效率曲线