

文章编号: 2095-4980(2018)06-0938-05

0.67 THz 折叠波导慢波结构损耗的计算

黄银虎, 胡 鹏, 雷文强, 蒋 艺, 宋 睿, 陈洪斌

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 在太赫兹频段, 损耗对折叠波导慢波结构的特性有显著影响。提出一种计算折叠波导慢波结构损耗的理论模型, 推导出弯曲波导的衰减系数。分别使用理论模型和商业仿真软件计算了 0.67 THz 折叠波导慢波结构的损耗, 二者的计算结果吻合较好, 表明理论模型有较高的精确度。最后, 使用理论模型分析了 0.67 THz 折叠波导慢波结构的结构参数变化对损耗特性的影响。

关键词: 太赫兹; 折叠波导; 损耗

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.0938

Loss calculation of 0.67 THz folded waveguide slow-wave circuit

HUANG Yinhu, HU Peng, LEI Wenqiang, JIANG Yi, SONG Rui, CHEN Hongbin

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Attenuation has significant influence on folded waveguide slow-wave circuit in the terahertz range. A theoretical model calculating the loss of folded waveguide slow-wave circuit is presented, and the attenuation coefficient of the bend waveguide is derived in this paper. The loss of 0.67 THz folded waveguide slow-wave circuit is evaluated by the proposed theoretical model and commercial simulation software respectively, the results of the two methods show perfectly accordant, which indicates the theoretical model has great precision. In the final, the influence of the variation of structure parameters on the loss of 0.67 THz folded waveguide slow-wave circuit is studied by the theoretical model.

Keywords: terahertz; folded waveguide; loss

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz(波长为 0.03~3 mm)范围内的电磁波。太赫兹波在电磁波频谱中占有很特殊的位置, 位于毫米波与红外线之间, 在学科研究上处于宏观电子学与微观光子学研究的交叉领域, 具有重要的科学意义和极大的研究价值。太赫兹辐射的独特性质, 使其在材料检测、安全检查、医学成像、高速率空间通信、高分辨武器制导等领域具有重要的研究价值和广泛的应用前景^[1-4]。

产生太赫兹波的器件主要分为基于半导体、光子学和真空电子学三类太赫兹辐射源, 其中真空电子器件太赫兹源具有功率大、可室温工作、环境适应性强等优点, 在太赫兹源的研究中处于重要位置。折叠波导作为太赫兹行波管的慢波结构有其突出优点, 其结构相对简单, 可与现代微加工技术相结合, 便于加工制造; 折叠波导是全金属结构, 因此功率容量大, 热稳定性好; 另外, 折叠波导行波管具有耦合腔行波管的一些特征, 其色散比较平坦, 工作带宽较宽。因此在众多太赫兹源中, 折叠波导行波管是最具发展潜力的低成本、小型化、大功率、宽带宽太赫兹源^[5-10]。

在折叠波导行波管的设计过程中, 色散特性、耦合阻抗决定了电磁波的产生, 而损耗特性决定了电磁波的耗散, 必须综合考虑。折叠波导慢波结构的材质为良导体金属, 并非理想导体, 电磁波将会透入产生功率损耗, 而趋肤深度随频率增加而减小, 加上加工部件表面粗糙度的影响, 损耗将大幅增加。因此, 在太赫兹频段, 损耗特性在慢波结构设计中更加重要^[11-12]。目前, 在折叠波导设计过程中, 损耗特性的计算大都依赖高频仿真软件, 理论计算较少。本文从基本电磁理论出发, 推导折叠波导损耗的计算公式, 计算 0.67 THz 折叠波导慢波结构的损耗大小, 与传统高频仿真软件计算结果进行比照。

1 理论与仿真模型

1.1 理论模型

图 1 为折叠波导慢波结构模型图，电磁波是在矩形波导内传播，而波导的周期性弯曲则降低了电磁波的“纵向”传播速度，通过合理的设计折叠波导慢波结构可以使得在其中传播的电磁波纵向相速与电子注速度同步，从而让电磁波获得电子注能量实现信号放大^[13]。

图 2 为其结构参数示意图，其结构参数如下： b 为矩形波导的窄边， p 为一个半周期长度， r_c 为内半圆弧半径， h 为直波导段长度， r 为电子束通道半径， a 为矩形波导的宽边， l 为波导中心线沿蜿蜒路径行进半周期 p 的长度，图中未标注。

显然，半周期 p 为计算慢波结构损耗的最小单元，在一个半周期 p 内，折叠波导可以拆分为一个长 h 的矩形波导和一个 $1/2$ 圆周的弯曲波导，半周期的损耗将为矩形波导和弯曲波导损耗的叠加。

$$Loss_p = \alpha_1 h + \alpha_2 l \tag{1}$$

式中： α_1 和 α_2 分别为直波导段和弯曲波导段的衰减系数； $l = \pi p / 2$ 。

折叠波导设计一般只考虑主模，矩形波导中 TE_{10} 模的衰减系数^[14]为：

$$\alpha_1 = \frac{R_s}{\eta \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \left[\frac{2}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 + \frac{1}{b} \right] \text{ (Np/m)} \tag{2}$$

式中：表面阻抗 $R_s = \sqrt{\omega\mu/2\sigma} = 1/\sigma\delta$ ， σ 为电导率， δ 为趋肤深度；波阻抗 $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ 。

可见要计算出半周期 p 的损耗，只需要推导出弯曲波导的衰减系数 α_2 即可。如图 3 在柱坐标系建立模型。在柱坐标系中，电磁波沿角向传播，只考虑最低次模，根据博格尼斯函数法，写出 TE 模 V 函数表达式(U 函数为 0)：

$$V(\rho, \varphi, z) = V_0 \left[N'_v(T r_c) J_v(T \rho) - J'_v(T r_c) N_v(T \rho) \right] \sin \beta z e^{-jv\varphi} = V_0 C_v(T \rho) \sin \beta z e^{-jv\varphi} \tag{3}$$

根据 V 函数可以写出各场分量的表达式：

$$E_\rho = -\frac{j\omega\mu}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \varphi} = -\frac{\omega\mu v}{\rho} V_0 C_v(T \rho) \sin \beta z e^{-jv\varphi} \tag{4}$$

$$E_\varphi = -j\omega\mu \frac{\partial V}{\partial \rho} = -j\omega\mu T V_0 C'_v(T \rho) \sin \beta z e^{-jv\varphi} \tag{5}$$

$$E_z = 0 \tag{6}$$

$$H_\rho = \frac{\partial^2 V}{\partial \rho \partial z} = T \beta V_0 C'_v(T \rho) \cos \beta z e^{-jv\varphi} \tag{7}$$

$$H_\varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi \partial z} = -\frac{jv\beta}{\rho} V_0 C_v(T \rho) \cos \beta z e^{-jv\varphi} \tag{8}$$

$$H_z = T^2 V = T^2 V_0 C_v(T \rho) \sin \beta z e^{-jv\varphi} \tag{9}$$

式中 β 由 z 方向两个电边界确定， $\beta = \frac{n\pi}{a} = \frac{\pi}{a}$ ($n=1$ ，只考虑最低次模)，横向角波数 T 由下式确定：

$$k^2 = \beta^2 + T^2 = \omega^2 \mu \epsilon \tag{10}$$

再由 ρ 方向上两个边界条件可得($r_1=r_c$)

$$J'_v(T r_1) N'_v(T r_2) - J'_v(T r_2) N'_v(T r_1) = 0 \tag{11}$$

解该超越方程，得到根 v 。

在良导体中，通过波导壁表面磁场强度切向分量 H_t ，可以求得波导壁法向有功功率密度：

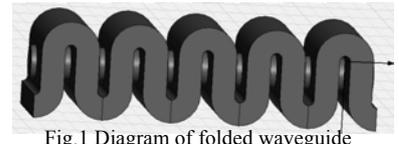


Fig.1 Diagram of folded waveguide slow-wave circuit model
图 1 折叠波导慢波模型图

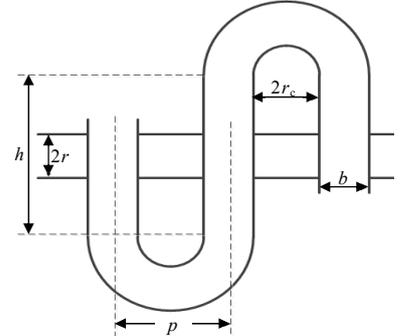


Fig.2 Parameter structure of folded waveguide slow-wave circuit
图 2 折叠波导慢波结构参数

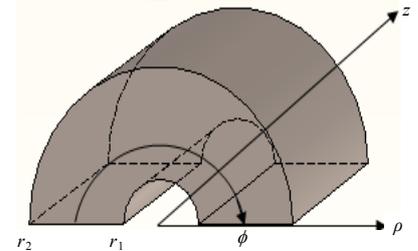


Fig.3 Coordinate of curved waveguide
图 3 弯曲波导坐标系

$$p_0 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sigma\delta} H_1^2 \tag{12}$$

在有损介质中， k 与 β 均为复数，求解亥姆霍兹方程十分繁冗，很难得到严格解，实际上波导壁都是由导电率很高的良导体构成，可以近似为理想导体，使用微扰法求解。即认为波导中大部分空间的场与理想波导中的场没有区别，只是在良导体表面出现了切向电场，它与原有的切向磁场形成沿法线方向进入非理想导体壁的坡印廷矢量，造成功率损耗。切向磁场可用理想导体的切向磁场来近似。

在弯曲波导的内弯曲面上，功率损耗：

$$P_1 = \iint_{\rho=r_1} p_0 dS = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sigma\delta} \iint_{\rho=r_1} [H_\phi^2 + H_z^2] p_0 dS = \frac{a}{4} \frac{1}{\sigma\delta} \pi r_1^2 C_v^2 (Tr_1) \left[\left(\frac{v}{r_1} \right)^2 \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + T^4 \right] \tag{13}$$

在弯曲波导的外弯曲面上，功率损耗：

$$P_2 = \iint_{\rho=r_2} p_0 dS = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sigma\delta} \iint_{\rho=r_2} [H_\phi^2 + H_z^2] dS = \frac{a}{4} \frac{1}{\sigma\delta} \pi r_2^2 C_v^2 (Tr_2) \left[\left(\frac{v}{r_2} \right)^2 \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + T^4 \right] \tag{14}$$

在 z 方向两侧壁，功率损耗：

$$P_3 = P_4 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sigma\delta} \iint_{z=0} [H_\phi^2 + H_z^2] dS = \frac{\pi V_0^2 \beta^2}{2\sigma\delta} \left[v^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{C_v^2(T\rho)}{\rho} d\rho + T^2 \int_{r_1}^{r_2} C_v^2(T\rho) \rho d\rho \right] \tag{15}$$

在弯曲波导中，沿角向传输的功率流：

$$P_\phi = \iint \operatorname{Re} \frac{1}{2} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{e}_\phi dS = \iint E_\rho H_z dS = \frac{a}{4} \omega \mu v T^2 V_0^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{C_v^2(T\rho)}{\rho} d\rho \tag{16}$$

所以弯曲段波导衰减系数：

$$\alpha_2 = \frac{P_1 + P_2 + 2P_3}{2IP_\phi} \text{ (Np/m)} \tag{17}$$

1.2 仿真模型

为了检验理论模型是否正确，采用通用的高频仿真软件 HFSS 进行模拟计算，模型如图 1 所示。在模型两端设置两个波导端口，端口模式设为模式 1，很容易得到主模的 S 参数。

在两端口微波网络中，可以通过仿真模拟得到的 S_{11} 和 S_{21} 参数来精确计算由该微波网络中损耗引起的吸收衰减，公式如下：

$$Loss = 10 \lg \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \tag{18}$$

在计算折叠波导慢波结构时假设输入输出段完全匹配，所以其微波网络的吸收衰减就可以认为是折叠波导慢波结构的损耗。如果所计算的微波网络中含有 N 个周期，则其每个周期的损耗为 $Loss/N^{[15]}$ 。

2 结果分析

利用上述理论模型和仿真模型对 0.67 THz 折叠波导慢波结构进行损耗分析，其结构参数为 $a=0.28$, $b=0.036$, $h=0.12$, $r_c=0.016$, $r=0.04$, (文中长度单位为毫米)，慢波结构材料为铜，电导率为 5.8×10^7 S/m，理论模型与 HFSS 仿真软件对慢波结构半周期 p 的损耗计算结果如图 4 所示。从结果可以看出，二者的计算结果基本一致，差别在 2% 以内，微小的误差主要是由于理论模型忽略了电子束通道的影响。因为理论模型的计算时间远小于仿真软件的时间，所以使用理论模型可以大大提高计算效率。用理论模型计算了直波导段和弯曲波导段的衰减系数(图 5)，弯曲段的衰减系数明显大于直波导段，这与预想一致，弯曲段的面电流密度明显比直波导段大(图 6)，由此造成的损耗功率密度当然也更大。

继续使用理论模型分析了各结构参数对慢波结构损耗特性的影响，结果如图 7~图 11 所示。从图 7 可知，

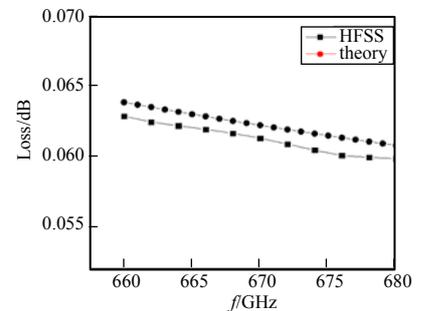


Fig.4 Comparison of loss calculation results of theoretical and simulation method
图 4 理论和仿真损耗计算结果对比

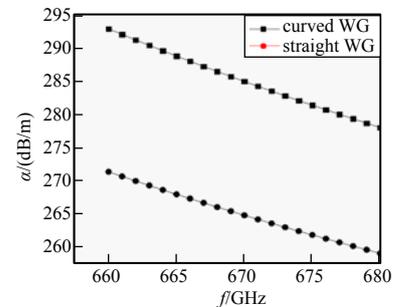


Fig.5 Comparison of loss in curved and straight waveguide
图 5 弯曲和直波导段损耗对比

损耗随参数 a 的减小而增大，这是因为 a 越小，越接近截止频率，在截止频率附近损耗急剧增加。图 8 表明 b 越大，损耗越小，设计中，在保证耦合阻抗的情况下，可以适当增加参数 b 的尺寸，以减小损耗。图 9 表明 r_c 越小，损耗越小，似乎与预想的波导越弯曲损耗越大矛盾。再计算了衰减系数随 r_c 的变化(图 10)，发现衰减系数随 r_c 减小而增大，但是 r_c 减小，使得弯曲波导段的长度减小，因而最后总的效果是损耗减小。如图 11，损耗随参数 h 增加而增加是显而易见的，直波导长度 h 并不影响其衰减系数的大小，其损耗与长度成正比。

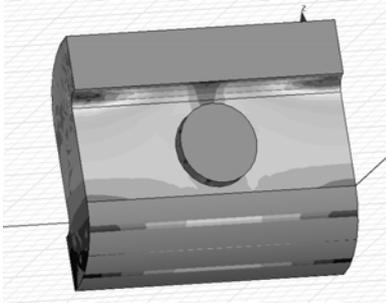


Fig.6 Distribution of surface current
图 6 面电流分布

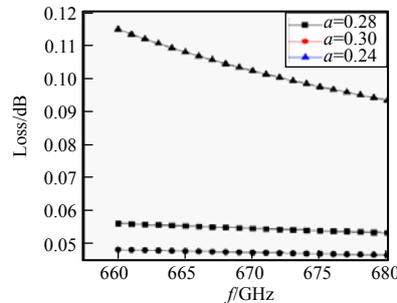


Fig.7 Loss varying with parameter a
图 7 参数 a 对损耗的影响

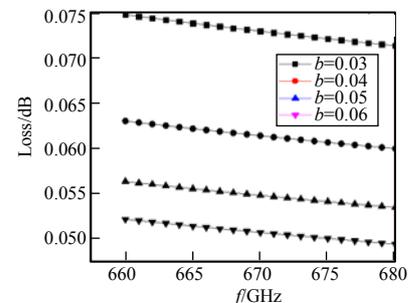


Fig.8 Loss varying with parameter b
图 8 参数 b 对损耗的影响

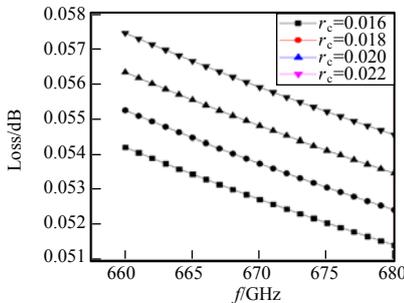


Fig.9 Loss varying with parameter r_c
图 9 参数 r_c 对损耗的影响

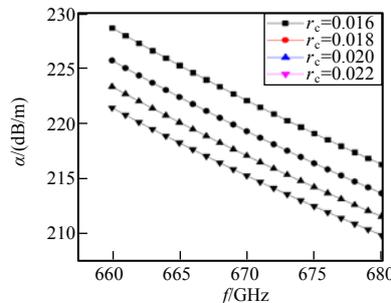


Fig.10 Attenuation coefficient varying with parameter r_c
图 10 参数 r_c 对衰减系数的影响

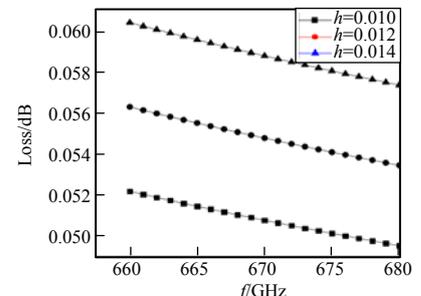


Fig.11 Loss varying with parameter h
图 11 参数 h 对损耗的影响

3 结论

从基本电磁理论出发，建立理论模型，推导了折叠波导慢波结构弯曲段衰减系数的计算公式，在 0.67 THz 折叠波导慢波结构的设计中，使用理论模型与高频仿真软件的计算结果对比表明：理论模型达到了较高的精确度，可用于实践设计；使用理论模型计算折叠波导慢波结构的损耗节约了计算时间，大大提高了设计效率。计算结果还表明，各结构参数在太赫兹波段对慢波结构损耗的影响很大，在 0.67 THz 折叠波导慢波结构的设计中，除了耦合阻抗、色散特性外，必须考虑损耗的影响，特别是结构参数 a, b, r_c ，微小的变化就会对整体的损耗产生很大影响，设计过程中必须谨慎选择。

参考文献：

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006,8(1):7-12. (LIU Shenggang. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006,8(1):7-12.)
- [2] 牧凯军,张振伟,张存林. 太赫兹科学与技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(3):221-229. (MU Kaijun,ZHANG Zhenwei,ZHANG Cunlin. Terahertz science and technology[J]. Journal of CAEIT, 2009,4(3):221-229.)
- [3] 徐翱,周泉丰,阎磊,等. 0.34 THz 折叠波导行波管设计及流通管实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):153-157. (XU Ao,ZHOU Quanfeng,YAN Lei,et al. Design for 0.34 THz folded waveguide TWT and runner pipe experiment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):153-157.)
- [4] 周泉丰,徐翱,阎磊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):166-170. (ZHOU Quanfeng,XU Ao,YAN Lei,et al. Study of designing 0.22 THz folded waveguide traveling wave tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):166-170.)
- [5] 张栋文,袁建民. 太赫兹技术概述[J]. 国防科技, 2015,36(2):12-15. (ZHANG Dongwen,YUAN Jianmin. Summary of terahertz technology[J]. National Defence Science & Technology, 2015,36(2):12-15.)

- [6] PETER H S. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910-924.
- [7] PARKER R K,ABRMS R H,DANLY B,et al. Vacuum electronics[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):835-845.
- [8] ABRAM R H,MONDELI A A,PARKER R K. Vacuum electronics for the 21st century[J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(3):61-72.
- [9] JACK C T,MARK A B,DAVID A G,et al. 0.85 THz vacuum electronic power amplifier[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey,CA,USA:IEEE, 2014:153-154.
- [10] JOHN C T,MARK A B,DAVID A G,et al. 220 GHz power amplifier development at Northrop Gruman[C]// IEEE International Conference on Plasma Science. Chicago,IL,USA:IEEE, 2012:553-554.
- [11] TUCEK J C,BASTEN M A,GALLAGHER D A,et al. A 100 mW, 0.670 THz power module[C]// IEEE 13th International Vacuum Electronics Conference. Monterey,CA,USA:IEEE, 2012:31-32.
- [12] LIU Shunkang,ZHOU Caiyu,BAO Zhengqiang. Transform characteristics of FW slow wave circuit[J]. Vacuum Electronic Technology, 2002,39(4):39-43.
- [13] 雷文强,蒋艺,胡林林,等. 0.14 THz 折叠波导行波管的设计与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):334-338. (LEI Wenqiang,JIANG Yi,HU Linlin,et al. Design and experiment for 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):334-338.)
- [14] 张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京:电子工业出版社, 2001:205-206,232-246. (ZHANG Keqian,LI Dejie. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics[M]. Beijing:Electronics Industry Press, 2001:205-206, 232-246.)
- [15] 徐翱,胡林林,陈洪斌,等. 太赫兹折叠波导慢波结构 S 参数特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(4):968-972. (XU Ao, HU Linlin,CHEN Hongbin,et al. S parameter characteristics of terahertz folded waveguide slow-wave circuit[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(4):968-972.)

作者简介:



黄银虎(1987-), 男, 四川省德阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波与太赫兹真空电子器件.email:1987hyh@sina.com.

胡鹏(1985-), 男, 四川省绵阳市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为毫米波与太赫兹真空电子器件.

宋睿(1984-), 男, 湖北省随州市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为毫米波与太赫兹真空电子器件.

雷文强(1972-), 男, 四川省绵阳市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为毫米波与太赫兹真空电子器件.

陈洪斌(1971-), 男, 重庆市丰都县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为大功率毫米波、太赫兹真空电子器件.

蒋艺(1985-), 男, 成都市人, 在读博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为毫米波与太赫兹真空电子器件.