文章编号: 2095-4980(2015)05-0718-04

# 220 GHz 折叠波导行波管慢波结构的损耗研究

潘 攀,李含雁,冯进军

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家重点实验室, 北京 100015)

摘 要:在太赫兹频段,折叠波导慢波结构的损耗很大,因此需要在设计 220 GHz 折叠波导 行波管慢波结构时进行深入研究。首先通过软件仿真的方法预测了慢波结构的 S 参数,然后利用 紫外光刻、电镀和微铸模成型(UV-LIGA)工艺制作了慢波结构样品并进行测量。测量结果表明,该 样品在 220 GHz 时衰减系数约为 240 dB/m,与仿真结果符合较好。显微照片显示,该样品产生了 形变,造成高频段 2 种结果存在差异。

**关键词:**折叠波导;损耗;衰减;太赫兹 中图分类号:TN772 **文献标识码:**A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0718

# Study on loss of the slow wave structure of a folded waveguide TWT at 220 GHz

PAN Pan, LI Hanyan, FENG Jinjun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The loss of the folded waveguide slow wave structure is significant in the terahertz regime, which is necessary to be well studied as designing the slow wave structure of a folded waveguide Traveling Wave Tube(TWT) at 220 GHz. In this paper, the *S* parameters of the slow wave structure are predicted firstly by simulation, and then the sample of the slow wave structure is fabricated by Ultra Violet-Lithographie, Galanoformung, Abformung(UV-LIGA) process and measured. The measurement result shows that the attenuation factor of the sample is about 240 dB/m at 220 GHz, which is reasonably consistent with the simulation result. The micrographs show that there is a discrepancy between two results at higher frequencies due to the sample deformation.

Key words: folded waveguide; loss; attenuation; terahertz

折叠波导行波管是一种重要的太赫兹真空电子器件,具有大功率、宽频带、易加工和便于能量耦合等优点。 中国电子科技集团第十二研究所对 W 波段折叠波导行波管已经开展了深入的研究<sup>[1-2]</sup>。随着频率进一步提高,折 叠波导慢波结构的尺寸不断减小,使得电磁波的传输损耗越来越大,已成为重要的设计参量。在太赫兹频段,电 磁波的趋肤深度接近甚至小于金属的表面粗糙度,此时再用金属的直流电导率计算损耗将产生很大误差,因此在 慢波结构设计时通常用金属的等效电导率来计算损耗。国内外对于 220 GHz 折叠波导行波管已开展了部分研究 工作<sup>[3-5]</sup>,但是关于等效电导率和损耗的研究较少,且结论相差较大。本文针对 220 GHz 折叠波导行波管慢波结 构的损耗开展仿真与实验研究,为后续的设计提供重要的参考数据。

#### 1 等效电导率

在 3 cm 波段的波导和谐振腔中, Morgan 发现电磁波的损耗比理论值高 10%到 60%,并且随着波长减小,这种差异进一步变大<sup>[6]</sup>。他认为由于电磁波的趋肤深度与金属的表面粗糙度处于同一数量级,粗糙表面使得面电流的传输路径变长,造成损耗增大,并进一步给出了几种理想情况下的理论解。Hammerstad 和 Bekkadal 在 Morgan 的研究基础上通过数据拟合给出了计算等效电导率的 HB 公式<sup>[7]</sup>。Yang 还通过实验证明,在 400 GHz 和 650 GHz 下,金的等效电导率可以用该公式来计算<sup>[8]</sup>。HB 公式的一种表述为:

$$\sigma_{\rm c} = \frac{\sigma}{\left\{1 + \frac{2}{\pi} \arctan\left[1.4\left(\frac{h}{s}\right)^2\right]\right\}^2}$$
(1)

式中: 趋肤深度  $s = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ ; h 为表面粗糙度;  $\sigma$  为直流 电导率。

潘

以 220 GHz 的电磁波为例,它在铜材料中的趋肤深度 约为 0.14  $\mu$ m,而经过共聚焦显微镜测量,采用 UV-LIGA 工艺制作的铜慢波结构的表面粗糙度约为 0.2  $\mu$ m。电磁波 的趋肤深度与金属的表面粗糙度正处于同一数量级,因此 公式(1)从理论上是适用的。据此可以计算出 220 GHz 时, 铜的等效电导率  $\sigma_c \approx 1.7 \times 10^7$  S/m。

图 1 为 220 GHz 时,铜的等效电导率与表面粗糙度 的关系。可以看出,随着表面粗糙度的增大,等效电导率 将大幅降低。不同的参考文献中等效电导率的数据差异正



图 1 220 GHz 时铜的等效电导率与表面粗糙度的关系(HB公式)

是由不同的工艺水平造成的。为了正确计算现有工艺水平制作的慢波结构损耗,必须进行仿真与实验验证。

## 2 软件仿真

图 2(a)为 220 GHz 折叠波导行波管慢波结构的示意图,图中标注的主要尺寸数值为: *a*=0.42 mm, *b*=0.16 mm, *p*=0.31 mm, *h*=0.25 mm, *d*=0.24 mm, *l*=120*p*=37.2 mm。图 2(b)为用 CST 微波工作室计算的仿真模型,中间为 120 个周期的折叠波导慢波结构,两端为过渡到 WR4.3 波导的渐变结构。背景材料为有耗金属,等效电导率为 1.7×10<sup>7</sup> S/m。该模型的 S 参数仿真结果见图 3。





(a) schematic(b) simulation modelFig.2 Schematic and simulation model of the folded waveguide slow wave structure图 2 折叠波导慢波结构示意图及其仿真模型





WR5.1 to

WR10 taper

WR3.4 to

WR10 taper

140 GHz-220 GHz

module

220 GHz-325 GH

module

WR10 to

WR4.3 taper

WR10 to

WR4.3 taper

WR10 to

WR5.1 taper

WR10 to

WR3.4 taper

140 GHz–220 GHz

module

220 GHz-325 GHz

module

WR4.3 to

WR10 taper

WR43 to

WR10 taper

## 3 样品测量

图 4 为用 UV-LIGA 工艺制作的 220 GHz 折叠波导行波管慢波结构样品。在东南大学 毫米波国家重点实验室对该样品的 *S* 参数进 行测量,使用矢量网络分析仪和 2 种频率扩 展模块(140 GHz~220 GHz, 220 GHz~ 325 GHz),如图 5 所示。由于该样品端口为 WR4.3 波导,而 2 种频率扩展模块的端口分 别为 WR5.1(140 GHz~220 GHz)和 WR3.4 (220 GHz~325 GHz),因此需要用过渡波导进 行转换。在测量样品前,先对过渡波导进行 测量,其  $S_{21}$ 约为–1.5 dB,  $S_{11}$ 小于–30 dB。 随后对样品进行测量,并从整体的  $S_{21}$ 中减去 过渡波导的  $S_{21}$ ,以此作为慢波结构的  $S_{21}$ 。

#### 4 结果分析

图 3 是 220 GHz 折叠波导行波管慢波结

(b) 220 GHz-325 GHz Fig.5 Schematic of the measurement of the sample 图 5 样品测量示意图

Fig.4 Sample of the slow wave structure fabricated by UV-LIGA process 图 4 用 UV-LIGA 工艺制作的慢波结构样品

Vector Network

Analyzer

DUT

(a) 140 GHz-220 GHz

Vector Network Analyzer

DUT

构的 *S* 参数仿真与测量结果,其中点为仿真结果,实线为样品测量结果。从图中可以看出,在 180 GHz~220 GHz 频率范围内,2 种结果的 *S*<sub>21</sub>比较一致,而实测的 *S*<sub>11</sub>有较大波动,这是由于样品的不规则变形造成的;而在 220 GHz~260 GHz 频率范围内,实测的 *S*<sub>11</sub>明显高于仿真结果,而实测的 *S*<sub>21</sub>明显低于仿真结果,这是由于样品的规则变形造成的。

图 6 为样品的显微照片,可以看出,慢波结构样品在经过高温退火后,端口和折叠波导起点变形较大,这种几何不连续会对电磁波产生明显的反射,使得实测的 *S*<sub>11</sub> 波动较大。从图 6(a)中还可以看到,实际加工的电子注通道并不在图形的几何中轴线上,而是向下偏了 0.02 mm,经过仿真计算,此时在 230 GHz 附近存在一个止带,从而引起该频率附近的 *S*<sub>11</sub>较大而 *S*<sub>21</sub>较小。此外,还发现该样品存在一种规则的变形,如图 7 所示。样品在高温环境下释放应力,电铸形成的自由面的形变量比基底的形变量大,导致波导的截面不再是矩形,而是变成了中间窄、两端宽的沙漏形。测量结果显示,中间的宽度比两端要小 0.02 mm~0.04 mm,经过仿真计算,此时基模的上截止频率从原先的 270 GHz 降低到 250 GHz 左右,这与测量结果相符合。



Fig.7 Schematics of the deformation of the sample 图 7 样品形变的示意图



由 S 参数可以计算出该慢波结构的衰减系数<sup>[9]</sup>:

$$\alpha \approx \frac{10 \lg \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2}}{I}$$
(2)

图 8 为 220 GHz 折叠波导行波管慢波结构的衰减常数,其中点为仿真结果,实线为样品测量结果。可以看到,在 180 GHz~220 GHz 频率范围内,2 种结果比较一致;在 220 GHz~260 GHz 频率范围内,由于样品变形,实测结果明显高于仿真结果。对设计 220 GHz 折叠波导行波管高频结构而言,关注的是 220 GHz 附近的衰减系数,约为 240 dB/m。



通过软件仿真和样品测量,证明了采用式(1)计算等效电导率,再用软件仿真计算损耗的方法是可行的;同时确定了用 UV-LIGA 工艺制作的 220 GHz 折叠波导行波管慢波结构的衰减系数约为 240 dB/m,用于指导下一步设计。显微照片显示,该样品有一定变形,这影响了测量结果。今后将继续改进工艺,制作尺寸更理想的样品,进一步验证研究结果。式(1)表明,减小慢波结构的表面粗糙度将大幅提高等效电导率,从而降低损耗。事实上,UV-LIGA 工艺可以达到的表面粗糙度远小于目前测量到的 0.2 μm<sup>[10]</sup>,为此,需要对这种工艺做更深入的研究。

#### 参考文献:

5

结论

- FENG Jinjun, CAI Jun, et al. Development of W-band folded waveguide pulsed TWTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(6):1715-1725.
- [2] HU Yinfu, FENG Jinjun, LIU Jingkai, et al. Progress of wide bandwidth W-band 20W CW TWT[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2014:179-180.
- [3] 王亚军,陈樟,程焰林,等. 太赫兹折叠波导慢波结构的设计与微加工[J]. 红外与毫米波学报, 2014,33(1):62-67.
  (WANG Yajun,CHEN Zhang,CHENG Yanlin, et al. Design and microfabrication of folded waveguide circuit for THz TWT[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2014,33(1):62-67.)
- [4] Joye C D,Cook A M,Calame J P,et al. Demonstration of a high power, wideband 220 GHz traveling wave amplifier fabricated by UV-LIGA[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(6):1672-1678.
- [5] 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.)
- [6] Morgan S P. Effect of surface roughness on eddy current losses at microwave frequencies[J]. Journal of Applied Physics, 1949,20(4):352-362.
- [7] Hammerstad E,Jensen O. Accurate models for microstrip computer-aided design[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Washington, DC, USA: IEEE, 1980:28-30.
- [8] YANG B B, Kirley M P, Booske J H. Theoretical and empirical evaluation of surface roughness effects on conductivity in the terahertz regime[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014,4(3):368-375.
- [9] 张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2001. (ZHANG Keqian,LI Dejie. Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2001.)
- [10] Shin Y M,Barnett L R,Gamzina D,et al. Terahertz vacuum electronic circuits fabricated by UV lithographic molding and deep reactive ion etching[J]. Applied Physics Letters, 2009,95(18):181505-181505-3.

#### 作者简介:



**潘**攀(1986-),男,北京市人,在读硕士 研究生,从事亚毫米波及太赫兹真空电子器件 研制.email:p-pan@hotmail.com. **李含雁**(1976-), 女, 浙江省嵊州市人, 高级 工程师, 从事微细加工工艺研究.

**冯进军**(1966-),男,山西省运城市人,研究员,从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS技术、太赫兹真空电子学等研究.