2016年12月

## 文章编号: 2095-4980(2016)06-0825-04

# 无氧铜和铁镍钴合金太赫兹波导传输损耗

唐 烨,冯进军

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

摘 要:对无氧铜、铁镍钴合金和镀金铁镍钴合金制作的 WR2.8 太赫兹波导进行了传输损耗的研究。通过对比实验测得的传输损耗值,计算出 340 GHz 频段,无氧铜电导率为 1.6×10<sup>7</sup> S/m, 铁镍钴合金电导率为 1.0×10<sup>6</sup> S/m,相对磁导率为 2.1,损耗参数的设置对正向设计具有指导作用。 实验中,通过镀金工艺降低了铁镍钴合金波导的传输损耗,进而明确波导内壁镀金工艺可以有效 降低传输损耗,对降低太赫兹标准窗的传输损耗有着实际意义。

关键词:太赫兹;无氧铜;铁镍钴合金;镀金;传输损耗

中图分类号:TN25 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA201606.0825

# Transmission loss in terahertz waveguides made of copper and iron-nickel alloy

TANG Ye, FENG Jinjun

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

**Abstract:** The transmission loss of WR2.8 waveguides made of copper, iron-nickel and gilded iron-nickel alloy at 340 GHz is presented in this paper. The measurement shows the process of gilding at iron-nickel alloy surface can reduce the transmission loss. The test results are compared with those of simulations in order to determine the settings for CST simulation of loss of these materials at 340 GHz. This study is of importance for reducing transmission loss of windows at 340 GHz and setting proper loss parameters for CST simulation of material loss.

Keywords: terahertz; copper; iron-nickel alloy; gilding; transmission loss

随着电真空器件向更高频率、更大功率发展,在太赫兹频段确定常用材料的传输损耗参量,对正确指导模拟 计算以及降低传输损耗都是十分重要的。众所周知,高频段下电磁波在矩形波导的传输损耗比低频段下的传输损 耗大很多。因此在高频段下,获得无氧铜和铁镍钴合金的传输损耗情况对模拟计算具有指导意义,探索降低损耗 材料的传输损耗工艺更加具有实际意义。

无氧铜作为制作高频慢波结构、波导的金属材料广泛使用在电真空器件中,电磁波在无氧铜中传输损耗很小, 目前可查得 260 GHz 下,无氧铜标准波导传输损耗为 13.76 dB/m<sup>[1]</sup>,文献[1]由于写作年限较早,没有 340 GHz 下无氧铜标准波导传输损耗的数据。近年来,国外在太赫兹频段对材料损耗也进行了研究工作,给出了一些可供 参考的数据<sup>[2]</sup>。为了掌握 340 GHz 下无氧铜传输损耗情况,本文对无氧铜直波导传输损耗进行了测量,将测量结 果与 CST 模拟结果对比,计算出无氧铜作为损耗材料的相关设置。

铁镍钴合金(简称可伐)被广泛使用在输能窗制作中。目前各频段使用的输能窗大多为对应频段下的标准窗, 如 340 GHz 频段的输能窗就是 WR2.8 波导口的标准窗<sup>[3]</sup>。可伐的传输损耗远高于无氧铜,在太赫兹频段这部分 损耗很大,不可忽略,减小传输损耗对增加器件的输出功率有实际意义,但是关于可伐在高频段的传输损耗工作 至今没有文献报道。由于可伐为导磁材料,在 CST 模拟中对其设置除了需要考虑电导率还要考虑磁导率,因此 反推其设置相对困难。本文以实测传输损耗为依据,进行材料设置的反推模拟工作,找到材料的相应设置,为正 向指导设计及模拟提供可靠依据,同时探索降低传输损耗的工艺方法,为降低太赫兹输能窗传输损耗提供了工艺 可行性方案。

#### 1 实验研究

Ð

ransmission loss/

-0.8

-1 (

利用高速铣制作了 WR2.8 直波导,如图 1 所示,波导尺 寸为 0.71 mm×0.355 mm, 长度为 22 mm。为了进行可伐材料 降低传输损耗的工艺研究,对部分可伐制作的直波导内壁进 行镀金处理,金层厚度大于 340 GHz 下的集肤深度。图 1 从 左到右依次为无氧铜直波导 1#和 2#、内壁镀金可伐直波导 1# 和 2#、可伐 直波导 3#和 4#。



Fig.1 WR2.8 straight waveguide made of different materials 图 1 自制不同材料的 WR2.8 标准直波导



Fig.2 Block diagram of transmission loss test 图 2 直波导传输损耗测量的原理框图

目前 340 GHz 频段的测试主要有 2 种方法,采用 340 GHz 矢量网络分析仪和在有信号源的条件下自搭系统 进行测试。实验室有 24 倍倍频器和 PM4 功率计,根据"比值法"<sup>[4]</sup>原理,自搭系统来完成测试。测试框图如图 2 所示。信号源频率范围为 13.75 GHz~14.6 GHz, 经过 24 倍倍频器后频段为 330 GHz~350.4 GHz, 设置信号源 每个步长为 0.05 GHz, 倍频后对应每个步长 1.2 GHz, 在每个频点下分别进行测量, 对测得的数据进行处理, 即 可得到传输损耗情况。首先将功率计直接与定向耦合器连接,记录功率计读数,然后接直波导,记录功率计读数。 将2次测量结果进行计算即得到损耗值。实际测量系统如图3所示。为了说明零件的加工精确度及测试的准确度, 对直波导 2 个方向的传输损耗分别进行了测试。L-R 表示直波导左侧接信号源进行损耗测试, R-L 表示直波导右

侧接信号源进行损耗测试。在这里需要指出2点:第1, 匹配测试需要使用匹配负载,并在端口使用短路面进行频 率响应来校准,由于目前匹配负载性能自测结果显示匹配 效果不佳,真实匹配情况未知,因此测得的匹配结果准确 性有待于进一步确认,本文没有将测得的匹配结果用作分 析; 第 2, 系统中引入了定向耦合器, 是为了测量匹配性 能时使用,测量传输损耗特性是不需要定向耦合器的,由 于匹配和传输特性测量使用了同一套系统,因此测量传输 特性时用匹配负载将其端接。



Fig.3 Photo of straight waveguide under test of transmission loss

图 3 直波导损耗实测系统照片 0 -0.2 2# L-R -0.2 # L.-R transmission loss/dB -0.4 R-I -0.4-0.6 -06 -0.8 -1.2 -1.4 **L** 330 -1.0 **–** 330 355 340 335 350 335 345 355 340 345 350 f/GHz f/GHz Fig.4 Test results of the 1# copper waveguide Fig.5 Test results of the 2# copper waveguide 图 4 1#无氧铜直波导传输损耗测量结果

图 5 2#无氧铜直波导传输损耗测量结果

对 2 个无氧铜直波导的传输损耗进行测试,测试结果如图 4 和图 5 所示。330 GHz~350 GHz 之间 1#无氧铜 直波导传输损耗在 0.9 dB ~1.2 dB 左右; 2#无氧铜直波导传输损耗相对 1#直波导小一些,在 0.7 dB~0.9 dB 之间。 2个直波导无论正接还是反接,传输损耗都较为一致。计算得到1#,2#无氧铜直波导传输损耗在340 GHz 分别为 45 dB/m 和 33 dB/m。对外购标准直波导采用相同方法进行测试,结果表明传输损耗在 340 GHz 下为 39 dB/m。 在 CST 中建立直波导模型,扫描电导率参数进行模拟计算,分别得到不同参数设置下模拟计算结果,如图 6

所示。模拟计算结果显示当电导率设置为 1.6×10<sup>7</sup> S/m 时,与 2#无氧铜直波导较为吻合。并且 1.6×10<sup>7</sup> S/m 为目 前在 340 GHz 频段对无氧铜电导率的设置,在 340 GHz 折叠波导慢波结构互作用计算中应用的正是这一数据<sup>[5]</sup>。

分析 2 个无氧铜直波导传输损耗差异较大的原因,无氧铜相对较软,加工或者装配时用力不当会引起形变, 导致匹配不佳,进而影响了传输损耗。这也从另一方面说明,在太赫兹频段加工零件时,对加工误差、装配精确 度等都应该有严格的要求,否则会引起较大的传输损耗,进而影响输出功率。

对可伐制作的直波导进行实验,由于 3#波导损坏,无法测量。本次实验只对 3 个直波导进行传输损耗的测 试。测试结果如图7所示。



测量结果显示镀金 1#和 2#传输损耗一致性较好且其传输损耗值在 2 dB~3 dB 之间,未镀金的 4#传输损耗值 在 4 dB~5 dB 之间。这说明标准窗波导内壁镀金可以大大降低传输损耗。其中 1#和 2#可伐传输损耗一致性很好, 分析原因由于可伐相对无氧铜较硬,加工、装配、焊接工艺对其形变的影响很小,因此传输损耗的一致性较好。

将镀金波导参照输能窗焊接工艺进行后对其进行传输损耗的测量,测量结果如图8所示。测量结果显示镀金 直波导真空炉烧后传输损耗较之前减小,分析原因,是金 层在真空炉中形成了较为平整的表面层紧密贴合在波导 内壁,因此传输损耗进一步减小了。对比未镀金可伐、镀 金可伐烧氢前后的传输损耗,认为输能窗窗架波导内壁镀 金对降低输能窗的传输损耗是有积极作用的,并且从工艺 上也是可行的。

目前对可伐材料在 CST 模拟中的设置尚未见报道, 可伐为磁性材料,对其设置不能像无氧铜一样只修改电导 率来模拟,需要同时考虑导磁率。根据测量中得到的可伐 传输损耗,将实测结果作为参考,同时考虑导磁率以及电 导率进行模拟,从而找到可伐材料的等效设置,进而指导 计算。

寻找与实际等效的设置是通过对电导率和磁导率的 扫描来完成的。首先,可以确定可伐的电导率小于无氧铜 的电导率,当电导率在 10<sup>6</sup> S/m 量级时,电导率对损耗的 影响就不是很大了。其次,通过模拟可以看出相对磁导率 对损耗的影响很大,如果设置相对磁导率大于10,模拟结 果显示损耗值可达-10 dB, 远远超出了实测值。最后, 假 定电导率为 1.0×10<sup>6</sup> S/m, 对磁导率进行参数扫描, 得到 当相对导磁率系数 μ为 2.1, 电导率为 1.0×10<sup>6</sup> S/m 时, 模 拟结果与实测结果一致性较好,如图9所示,二者误差值 只有在 336 GHz 处为 0.4 dB, 其余频点均小于 0.2 dB。图 9中当相对磁导率为2和2.2时,与实测结果的偏差都比



Fig.8 Transmission loss of iron-nickel alloy in different situations 图 8 镀金可伐直波导真空炉烧前后损耗变化



Fig.9 Test results vs. simulation results of transmission loss of iron-nickel alloy waveguide

图 9 可伐直波导传输损耗实测与模拟结果对比

当相对磁导率为 2.1 时大,因此对比模拟结果与实测结果,认为找到了可以和实际情况等效的设置,即认为相对 磁导率 2.1 为与实际等效的设置。图 9 中实测结果有波动,这是由于反射而引起的,并且反射越大,损耗值越大。 在这里需要指出,根据 CST 帮助<sup>[6]</sup>,软件设置中电导率为材料真实电导率,μ为相对磁导率系数,可伐为磁性 材料,其静态下的磁导率值很大,但是在高频率、微波条件下的磁导率目前未知,本次模拟只是找到了与真实情 况等效的可伐材料设置。

# 2 结论

本文对 340 GHz 下无氧铜、可伐和镀金可伐直波导进行了测试,根据测试结果对材料损耗进行了量化分析,明确采用镀金工艺来降低输能窗传输损耗的工艺方案,通过实验结果反推出材料的电导率和相对磁导率系数设置,对该频段下模拟具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] SAAD T S. Microwave Engineers' Handbook[M]. [s.l.]:Artech House, 1971.
- [2] KIRLEY M P,BOOSKE J H. The physics of conductivity at terahertz frequencies[C]// 2015 IEEE International on Vacuum Electronics Conference(IVEC). Beijing:[s.n.], 2015:1-2.
- [3] 唐烨,冯进军. 340 GHz 返波振荡器输能窗的设计与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(6):788-791. (TANG Ye,FENG Jinjun. Design and study of the window used in 340 GHz back-ward wave oscillator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(6):788-791.)
- [4] 李镇远,冯进军,梁友焕,等. 行波管中的微波测量技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2013. (LI Zhenyuan, FENG Jinjun, LIANG Youhuan. Microwave Measurement Technologies for Travelling Wave Tubes[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2013.)
- [5] PAN Pan,LI Hanyan,FENG Jinjun. Study on loss of folded waveguide structures of 220 GHz and 340 GHz[C]// 17th IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey,California:[s.n.], 2016:439-440.
- [6] CST-computer simulation technology[EB/OL]. [2016-05-12]. http:// www.cst.com.

# 作者简介:



**唐** 烨(1983-), 女, 长春市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为返波振荡器的研制.email:tangye12research@163.com.

**冯进军**(1966-),男,山西省运城市人,研究员, 博士生导师,主要从事真空电子学、微波电子学、 等离子体电子学、MEMS技术、太赫兹真空电子学、 高频集成真空电子学等领域的研究工作,研究的器 件包括毫米波空间行波管、W波段行波管、太赫兹 真空器件、铯束管等.