Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2016)01-0018-05

THz 交错波导慢波结构高频损耗研究

王晨曦^a,杨 军^b,李浩光^a,邓光晟^b,尹治平^b,吕国强^b (合肥工业大学 a.仪器科学与光电工程学院; b.光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:利用等效电导率方法对310 CHz的双栅交错波导慢波结构中电磁信号的传输损耗进行 了仿真研究,比较了不同导体表面粗糙度和不同谐波造成的高频损耗的影响。仿真结果表明表面 粗糙度会使传输信号严重衰减,频率相同的-1和+1次空间谐波传输损耗也有较大差异,传输-1次 空间谐波时的导体单位损耗更大,且随表面粗糙度增加,损耗增加速度更快。模拟了不同的粗糙 度对慢波结构增益、带宽等工作性能参数的影响,结果显示高频损耗会使增益下降、带宽降低。 关键词:太赫兹; 交错波导; 慢波结构; 高频损耗

中图分类号:TN124 文献标识码:A doi:10.11805/TKYDA201601.0018

Investigation on loss characteristics of staggered double vane

slow-wave structure

WANG Chenxi^a, YANG Jun^b, LI Haoguang^a, DENG Guangsheng^b, YIN Zhiping^b, LV Guoqiang^b (a.School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering; b.Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: The equivalent-conductivity method is applied to the simulation work of electromagnetic transmission attenuation for 310 GHz double vane slow-wave structure. The factors which will influence the transmission attenuation, including surface roughness and harmonic mode, are studied. The result shows that roughness will result in serious electromagnetic attenuation. The -1st and the 1st harmonics at the same frequency result in different transmission attenuations; and the -1st harmonic results in greater electromagnetic attenuation which will increase faster when roughness grows up. The process of the beam-wave interaction of structure is also simulated. Especially the influence of roughness on working performance of Strategic Weapons Systems(SWS), such as gain, bandwidth, is analyzed. The results show that roughness causes gain reduction and bandwidth decrease.

Key words: terahertz; double vane waveguide; slow-wave structure; loss

近年来,由于太赫兹(THz)波在雷达、通信、成像等方面具有高分辨力和高数据传输率等重要特性而受到广 泛关注^[1-5]。但是目前缺乏室温下运行的紧凑的 THz 功率源以及检测手段,严重制约了 THz 技术的发展。而 THz 带状电子注器件方面取得了迅速的发展,特别是微加工技术和真空电子学结合形成的微型真空电子器件,其工作 频率可以达到 100 GHz 以上。慢波结构是太赫兹行波管和返波振荡器等真空电子器件的重要结构,其中具有二 维结构的交错双光栅全金属慢波结构,与其他慢波结构相比,具有增益较高、带宽较大、功率容量较大、散热性 较好等优点,具有较高的研究价值和应用前景^[6]。电磁波传输损耗是慢波结构的重要指标之一,是慢波结构设计 的必要环节^[7]。美国加州大学戴维斯分校的 SHIN Youngmin 等人对交错慢波结构进行了简单的理论分析^[8],但没 有详细研究其高频损耗。中国科学院的刘青伦等人运用场匹配法对具有任意位错的双排矩形栅慢波结构的场分 布、色散特性及耦合阻抗进行了研究^[9],也没有详细分析其高频损耗。

对于全金属的交错波导慢波结构而言,其电路分布损耗只来自于导体损耗。在太赫兹波段,由于金属的趋肤 效应急剧增加和加工精度的限制,导体损耗大幅增加。此外,工作在不同模式的空间谐波对慢波结构的损耗也有 一定影响。本文分析了金属表面粗糙度对其等效电导率的影响,计算了不同表面粗糙度下交错波导慢波结构的传 输损耗,比较了同一频率在不同空间谐波模式下在慢波结构的传输损耗,采用粒子模拟的方法研究了不同等效电 导率对慢波结构增益、带宽等工作性能参数的影响。

1 结构模型

交错波导慢波结构是一种全金属慢波结构,如图 1 所示, *d*,*b*,2*a*,*h*,*w* 分别代表着结构周期、齿槽宽度、电子 通道、齿高和慢波宽度电磁波沿交错波导传播,矩形电子注沿中间的通道传输,两者相遇时发生强的注-波互作 用,把电子注的动能转化为电磁场的能量。慢波结构的色散如图 2 所示。为了使电磁场信号以尽可能小的反射率 及损耗在整个高频电路中传输,并很好地输出高频信号,必须设计慢波过渡结构以及两级慢波结构之间的连接波 导。本文采用慢波结构金属栅高等差逐渐减小及槽底部等差逐渐增加的方式,慢波结构最后过渡到一个矩形波导。 调整优化各参数,使其工作在 310 GHz 频率,慢波结构长度为 110 周期,其中正常周期为 90,两端各有 10 个周 期的渐变结构。





(b) transmission structure

Fig.1 Conceptual drawings of dimensional parameters and transition structure 图 1 各参数的示意图和过渡结构

2 传输损耗

2.1 考虑粗糙度时的等效电导率

由于工艺问题,全金属慢波结构存在粗糙度与 THz 波段的趋肤深度比较接近,对器件的传输性能有较大的 影响^[10]。目前使用微细电火花加工的金属表面粗糙度为 1 μm 左右,而使用 UV-LIGA 工艺的粗糙度能达到 30 nm 左右^[11]。计算金属在不同粗糙度下的等效电导率,主要有 2 种根据经验公式的计算模型,分别为 Hammerstad 根 据微带传输线推导的模型和 Groiss 根据腔体谐振器推导的模型,2 种模型在计算 310 GHz 频率,表面粗糙度达 到 0.3 μm 后趋于一致^[12]。本文采用 Groiss 模型计算等效电导率。



设计的慢波结构各尺寸参数 d=350 μm,b=245 μm,2a=100 μm,h=210 μm,w=550 μm,信号频率为 310 GHz,图 3 中等效电导率为 5.76×10⁷ S/m(粗糙度 20 nm)下慢波结构的传输系数,在 300 GHz~320 GHz 波段,S11< -28.3 dB, $S_{21} \ge 5.2$ dB。图 4 比较了不同表面粗糙度下的传输系数,根据传输系数计算出 310 GHz 频率下慢波结构的衰减系数,结果如图 5 所示。可以看出,慢波结构的单位损耗随金属表面粗糙度的增加而逐渐增大,表面粗糙度为 0.1 μm 时单位损耗比光滑表面时高 0.8 dB/cm。

2.2 传输模式对于传输的影响

慢波结构对于不同模式的空间谐波损耗不同。这是由于不同空间谐波电场分布不同,在电磁壁上损耗也会不同。调整交错波导慢波结构的单周期长度 *d*, *d*₁=251 μm,*d*₂=350 μm,使其分别工作在-1 次和+1 次空间谐波,工作频率都为 300 GHz,即 2 个模式具有相同的相速,2 种模式下慢波结构的色散曲线如图 6 所示,计算得到的单位长度损耗如图 7 所示,工作在-1 次谐波时,慢波结构的单位损耗比工作在+1 次谐波时高,且随着表面粗糙度的增加,单位损耗增加得更快。



3 互作用特性

电磁信号传输损耗对交错波导慢波结构的增益、带宽、最佳工作长度等工作性能有很大影响,因此建立 110 周期的慢波结构,利用粒子模拟方法对不同等效电导率下注波互作用进行计算分析。等效电导率设置如表 1 所示。其中 1.5×10⁷ S/m 是表面粗糙度为 1 μm 时无氧铜的电导率,此时等效电导率已经趋于最小值。继续增大表面粗糙度,等效电导率不会显著改变。设置行

表1 310 GHz频率时各表面粗糙度下无氧铜的等效电导率 Table1 Equivalent conductivities of annealed cooper in different surface roughnesses at 310 GHz

roughness/µm	conductivity/ $(10^7 \text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
0	5.8
0.05	3.6
1.00	1.5

波管的工作电压为 18.5 kV, 电流为 30 mA, 输入信号为 90 mW, 慢波长度 d=350 μm, 分别模拟各等效电导率下 行波管的注--波互作用。 慢波结构的带宽和增益如图 8 所示,等效电导率减小时,行波管增益降低,带宽减小,且电导率对增益的影响随频率增高而更加明显。波导材料为理想导体时,3 dB 带宽约为 19 GHz,范围为 303 GHz~322 GHz。有限电导率引起的电磁传输损耗使得慢波结构带宽减小,5.8×10⁷ S/m 时约为 17 GHz,3.6×10⁷ S/m 时约为 16 GHz,1.5×10⁷ S/m 时约为 15 GHz。材料为理想导体的互作用增益比表面粗糙度为 1 μm 时增益大 4 dB 以上。相对于理想导体,材料的有限电导率引起的传输损耗增加时,最大增益点前移了 2 GHz。



4 结论

第 1 期

本文针对 310 GHz 交错波导慢波结构,完成了冷腔和热腔的数值模拟工作。仿真结果表明导体的表面粗糙 度严重影响交错波导慢波结构的传输损耗,模拟 310 GHz 交错波导的传输损耗,设置导体材料为无氧铜,当表 面粗糙度为 0.1 µm 时单位损耗比光滑表面时高 0.8 dB/cm。传输-1 次空间谐波时单位损耗比传播+1 次空间谐波 时更大。导体的电导率越小,交错波导行波管的增益越低,带宽越窄。材料的有限电导率引起的传输损耗会减小 慢波结构的增益和带宽,材料电导率为 1.5 × 10⁷ S/m 时比理想导体时的增益减小 4 dB,带宽减小 4 GHz,同时最 大增益点前移 2 GHz。

参考文献:

- [1] 梁美彦,邓朝,张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):189-198. (LIANG Meiyan, DENG Chao,ZHANG Cunlin. THz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):189-198.)
- [2] 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(2):1-6. (ZHAO Guozhong. Progress on terahertz science and technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014,33(2):1-6.)
- [3] ITO H. Breakthroughs in Photonics 2013:Terahertz Wave Photonics JJ. Photonics Journal, IEEE, 2014,6(2):1-5.
- [4] 李纪舟,蒋文涛. 太赫兹波通信技术研究现状及展望[J]. 通信技术, 2014,47(4):348-353. (LI Jizhou,JIANG Wentao. Terahertz communication technology research status and prospects[J]. Communications Technology, 2014,47(4):348-353.)
- [5] 江舸,杨陈,周晓青,等. 雷达信号处理技术在太赫兹成像中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1555-1560.
 (JIANG Ge,YANG Chen,ZHOU Xiaoqing, et al. Application of radar signal processing in terahertz imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1555-1560.)
- [6] 赖剑强,魏彦玉,黄民智,等.W 波段交错双栅返波振荡器高频系统[J].强激光与粒子束, 2012,24(9):2164-2168. (LAI Jianqiang,WEI Yanyu,HUANG Minzhi,et al. RF circuit for W-band staggered double vane backward wave oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(9):2164-2168.)
- [7] 张芳,董志伟,杨温渊,等. 345 GHz 折叠波导行波管中电磁传输损耗的分析计算[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(4): 38-41. (ZHANG Fang,DONG Zhiwei,YANG Wenyuan,et al. Electromagnetic field's transmission attenuation in 345 GHz folded waveguide traveling-wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(4):38-41.)
- [8] SHIN Y,BARNETT L R. Intense wideband terahertz amplification using phase shifted periodic electron-plasmoncoupling[J]. Applied Physics Letters, 2008,92(9):91501.
- [9] 刘青伦,王自成,刘濮鲲,等. 基于场匹配法的双排矩形栅慢波结构高频特性研究[J]. 物理学报, 2012,61(24): 214-221. (LIU Qinglun,WANG Zicheng,LIU Pukun, et al. Analysis of high frequency characteristics of the double-grating

rectangular waveguide slow-wave-structure based on the field match method[J]. Acta Phys. Sin., 2012,61(24):214-221.)

- [10] 刘俊,周亚军,戴晶怡,等. 0.22 THz 折叠波导慢波结构微细 WEDM 加工技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3):330-333. (LIU Jun,ZHOU Yajun,DAI Jingyi,et al. Micro-WEDM technology of 0.22 THz folded waveguide slow wave structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):330-333.)
- [11] 陆希成,童长江,王建国,等. 太赫兹真空电子器件微加工技术及后处理方法[J]. 真空科学与技术学报, 2013,33(6):
 506-516. (LU Xicheng, TONG Changjiang, WANG Jianguo, et al. Microfabrication and post-processing technologies of terahertz vacuum electronic device[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013,33(6):506-516.)
- [12] 王亚军,徐翱,颜胜美,等. 0.14 THz 折叠波导慢波结构的损耗特性[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(1):140-144. (WANG Yajun,XU Ao,YAN Shengmei, et al. Experiment on loss characteristics for 0.14 THz folded waveguide slow-wave structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(1):140-144.)

作者简介:



王晨曦(1989-),男,河南省洛阳市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹真空电 子器件.email:wcx@outlook.com.

邓光晟(1982-),男,重庆市人,博士,助理研究员,

尹治平(1980-),男,湖南省常宁市人,博士,副研

主要研究方向为基于真空电子学的太赫兹绕射辐射器件.

究员,硕士生导师,主要研究方向为雷达与微波成像.

杨 军(1978-),男,安徽省淮南市人,博士,副研究员,主要研究方向为微波电子学、微波毫米波器件、电磁场计算以及 THz 微型真空电子器件技术与工程.

李浩光(1989-),男,安徽省淮南市人, 在读硕士研究生,主要研究方向为基于真空 电子学的太赫兹绕射辐射器件.

吕国强(1962-),男,浙江省新昌县人, 教授,博士生导师,主要研究方向为显示技 术和行波管技术.

第二十九届国际弹道大会征稿启事

由国际弹道学会主办的第 29 届国际弹道大会将于 2016 年 5 月 9~13 日在英国爱丁堡召开。这是世界常规兵器领域举办的一项重要学术交流活动。

目前,会议投稿系统已经全面开通,网站支持会议注册、提交论文摘要以及论文和陈述报告等。提交论文摘 要的截止日期为 2015 年 7 月。请有意参会的专家学者踊跃投稿,征文范围可登陆国际弹道学会官网了解。我会 Defence Technolgy(防务技术)期刊作为本届大会的会议特刊,同时接受论文投递,特刊截稿日期为 2015 年 9 月 15 日。

有关会议详细信息请登录国际弹道大会官方网站: http://www.ballistics.org, 或登录 Defence Technolgy(防务 技术)官方网站 http://www.elsevier.com/journals/defence-technology/2214-9147。

《防务技术》编辑部联系人: 李莹 010-68964830 15210511025 学术与组织管理部联系人: 葛萌 010-68963055 15201643738