

文章编号: 2095-4980(2014)02-0153-05

0.34 THz 折叠波导行波管设计及流通管实验

徐 翱^{a,b}, 周泉丰^{a,b}, 阎 磊^{a,b}, 胡 鹏^{a,b}, 陈洪斌^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 以 0.34 THz 折叠波导行波管为研究对象, 分析了慢波结构的色散特性、耦合阻抗、冷损耗特性和工作模式等, 并按优化后折叠波导慢波结构的要求设计电子光学系统, 进行流通管实验, 得到电子注通过率大于 80% 的实验结果。最后对输入输出结构进行优化设计, 满足中心频率为 0.345 THz, 带宽大于 10 GHz, 输出功率大于 20 mW 的 0.34 THz 折叠波导行波管设计要求。

关键词: 折叠波导行波管; 慢波结构; 电子光学系统; 输入输出结构

中图分类号: TN124⁺.2

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0153

Design for 0.34 THz folded waveguide TWT and runner pipe experiment

XU Ao^{a,b}, ZHOU Quan-feng^{a,b}, YAN Lei^{a,b}, HU Peng^{a,b}, CHEN Hong-bin^{a,b}

(a.Institute of Applied Electronics; b.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Based on the research of 0.34 THz folded waveguide Traveling Wave Tube(TWT), dispersion characteristic, coupling impedance, loss characteristic and operating mode are analyzed. And electron optics system is designed for the 0.34 THz folded waveguide TWT. Test result of electron beam pass ratio greater than 80% is obtained by the beam practice experiment. The input and output structure optimal design is accomplished, and design indexes of the 0.345 THz folded waveguide are achieved for frequency band greater than 10 GHz and output power greater than 20 mW.

Key words: folded waveguide Traveling Wave Tube; slow-wave structure; electron optics system; output/input structure

折叠波导是由直波导周期性弯曲而形成的一种慢波结构, 如果将其从横截面中心线对称剖开, 则可将其看作两半对称的二维平面结构。因此折叠波导慢波结构和微细加工工艺能很好地结合, 实现高精确度的微型结构加工。随着行波管工作频率进入太赫兹波段, 其慢波结构的尺寸也进入微米量级, 且对加工精确度的要求非常苛刻, 结合微细加工技术的折叠波导慢波结构成为太赫兹行波管的一个研究热点^[1-4]。目前美国 NG 公司已经研制出中心频率为 0.656 THz, 增益 21.5 dB, 带宽 15 GHz 的折叠波导行波管放大器, 并将其用于功率模块中^[5]。白俄罗斯的研究人员报道了对 0.6 THz~3 THz 折叠波导行波管频率特性的研究, 并预测能在该频率范围内得到 30 dB~40 dB 的增益和 5 W~18 W 的输出^[6]。目前国内在太赫兹波段只有中物院十所初步研制出了 0.22 THz 折叠波导行波管, 输出功率大于 100 mW, 带宽 3.5 GHz^[7]。

通过模拟和实验发现, 在频率 0.2 THz~0.3 THz 之间, 电磁波的大气衰减比较低, 但达到 0.3 THz 波段后, 大气衰减随着频率的升高迅速上升, 只有中心频率 0.34 THz, 0.42 THz, 0.67 THz 和 0.86 THz 等附近有相对透明的大气窗口^[8]。因此太赫兹通信、雷达等应用都围绕在这些大气窗口频率附近开展。而 0.34 THz 作为频率进入 0.3 THz 以后的第一个大气窗口, 有着非常重要的研究意义与应用价值。

本文对 0.34 THz 折叠波导行波管慢波结构的色散、耦合阻抗、损耗、工作模式等特性进行分析, 并根据优化后的慢波结构参数, 提出了 0.34 THz 折叠波导行波管电子光学系统的设计要求。

1 慢波结构

慢波结构是行波管中电子注与电子波发生相互作用的部分, 它直接决定了行波管的色散、耦合阻抗、冷损

耗和工作模式等。折叠波导慢波结构中,电磁波在矩形波导内传播,而波导的周期性弯曲则降低了电磁波的“纵向”传播速度,合理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。随着计算机仿真技术的不断发展,可使用三维仿真软件对折叠波导慢波结构进行比较准确的分析,如图 1 所示。

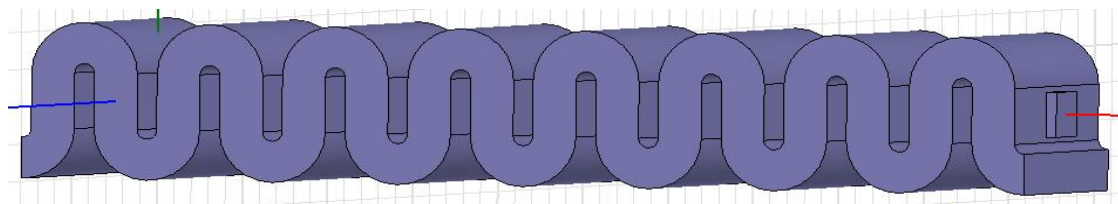


Fig.1 Folded waveguide
图 1 折叠波导模型

进行折叠波导慢波结构的仿真需要有一套初始设计参数,这套参数一般由理论推导或由其他波段的折叠波导慢波结构等比例推算得到。由于折叠波导行波管的输入接口接标准矩形直波导,因此其输入的激励信号模式就是 TE_{10} 模,通过合理设计,使得慢波结构中的工作模式与激励信号的模式一致,如图 2 所示,这样在电子注通道处电场较大,从而保证电磁波与电子注更好地相互作用。对慢波结构中可能存在的多个模式的色散特性进行分析,也可以确定只有 TE_{10} 模的工作频率包含 0.34 THz,其他模式的工作频率都远大于它。通过仿真软件,可以模拟计算得到各个模式的色散曲线,如图 3 所示。

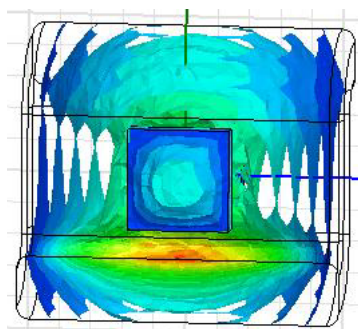


Fig.2 Mode
图 2 工作模式

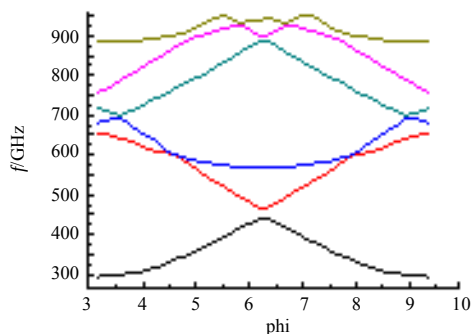


Fig.3 Dispersion for multiple modes
图 3 多个模式的色散特性

色散特性是慢波结构中最重要参量,关系到行波管的工作电压、频带宽度、工作频率等一系列重要指标。折叠波导慢波结构设计是希望色散曲线越平坦越好,这样才能保证该行波管有较宽的带宽。由于 0.34 THz 折叠波导行波管慢波结构的尺寸都在微米量级,其对加工精确度的要求也就非常高,在设计时必须考虑到现有的加工能力是否能达到要求,以及设计尺寸对加工误差的容忍度。综合考虑多种因素,设计 0.34 THz 折叠波导行波管慢波结构时,选择工作中心频率点 0.345 THz。色散曲线相位选择 1.47π 左右,如果所取相位过高,则相邻频率点相速变化太大,难以保证行波管带宽;如果所取相位过低,则耦合阻抗非常小,难以保证电磁波与电子注能够较好地相互作用,优化后折叠波导慢波结构的色散曲线如图 4 所示。

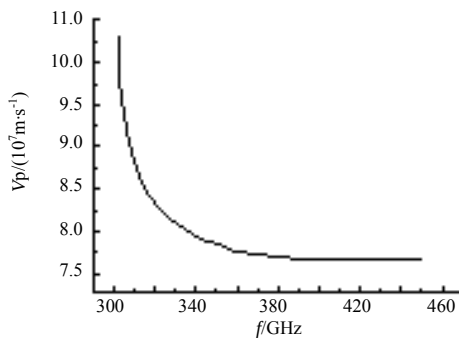


Fig.4 Dispersion
图 4 色散特性

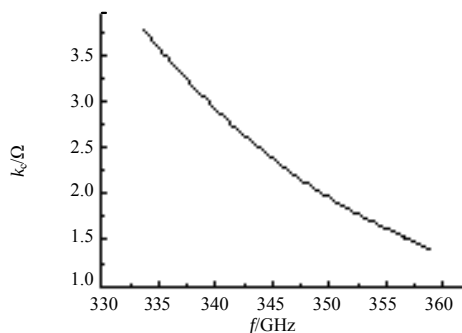


Fig.5 Coupling impedance
图 5 耦合阻抗

耦合阻抗表征了慢波系统中纵向高频电场与电子注之间能量交换的有效程度。耦合阻抗越大,则电子注交出的能量越多,但在同种结构的行波管中,选择的工作点耦合阻抗越大,往往意味着带宽越窄,因此在设计时需要兼顾色散特性和耦合阻抗。使用仿真软件计算耦合阻抗,一般是通过对电子注通道纵向中心线的场进行积分得到。太赫兹折叠波导慢波结构的耦合阻抗并不高,一般小于 $4\ \Omega$,如图5所示,图中计算结果使用的电子注通道为边长 $0.16\ \text{mm}$ 的正方形。

太赫兹波在金属中传播时,其集肤深度与加工的金属表面粗糙度相似,如 $0.34\ \text{THz}$ 电磁波在铜中传播时,其集肤深度为 $0.11\ \mu\text{m}$,而精密微加工表面粗糙度一般在 $0.1\ \mu\text{m}\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 之间,因此太赫兹折叠波导慢波结构的冷损耗是不可忽略的。通过对其他频段折叠波导行波管的研究,可以对已有的计算表面粗糙度对等效电导率影响的公式^[7]增加修正因子,从而推测 $0.34\ \text{THz}$ 电磁波在折叠波导慢波结构中传播时无氧铜的等效电导率为 $2.5 \times 10^7\ \text{S/m}$ 左右。将该值代入 CST 等仿真软件,可得到 $0.34\ \text{THz}$ 折叠波导慢波结构的损耗特性。一般计算时选择多个周期进行计算,然后将计算的损耗值除以周期数,可得到单个周期的损耗特性,如图6所示。

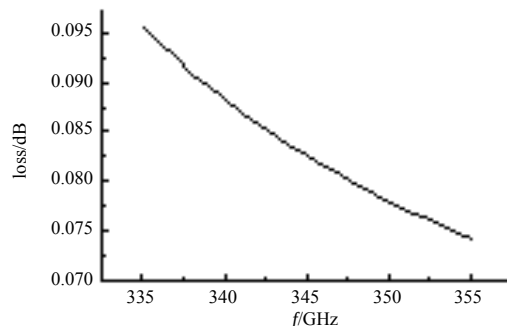


Fig.6 Loss for one period
图6 单个周期的损耗特性

2 注波相互作用计算

由于推导折叠波导慢波结构中场的准确表达式比较困难,目前对折叠波导慢波结构注波相互作用的研究主要依靠粒子模拟计算的方法,计算模型如图7所示。

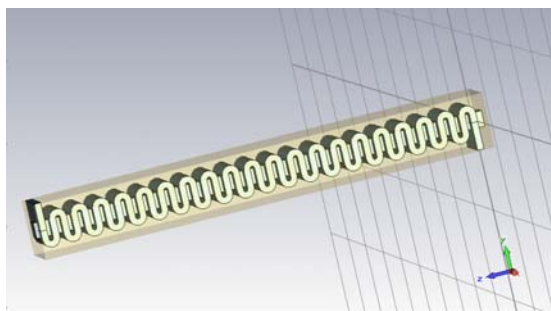


Fig.7 Calculating model
图7 计算模型

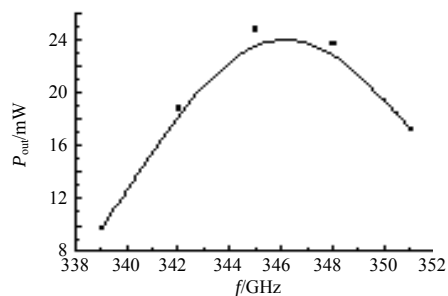


Fig.8 Calculating result
图8 计算结果

考虑到标准信号源的输出功率在 $0.34\ \text{THz}$ 频段一般只有几毫瓦,且测试太赫兹折叠波导行波管时输入端还有一定的损耗,因此选择输入功率为 $0.4\ \text{mW}$ 。经过反复优化计算,最终得到 $0.34\ \text{THz}$ 折叠波导行波管的中心频率为 $0.345\ \text{THz}$,周期数为 321, $3\ \text{dB}$ 带宽约 $12\ \text{GHz}$,最大输出功率 $24.7\ \text{mW}$,如图8所示。

3 电子光学系统

太赫兹折叠波导行波管电子光学系统包括电子枪、聚焦磁场和收集极3部分,如图9所示。

考虑到太赫兹折叠波导行波管应用的实际情况,可以使用经典的皮尔斯电子枪作为其产生和形成电子注的部分。这种电子枪由阴极、聚焦极和阳极3部分组成,通过理论分析和推导,可得出皮尔斯电子枪的初步设计参数。使用大型仿真软件对初步设计出来的结构进行计算,然后根据计算结果,再进行理论分析和优化,如此循环优化,直至得出最优的结构。这样可得到电子枪的结构参数,再通过实验研究,得到最终的优化设计。

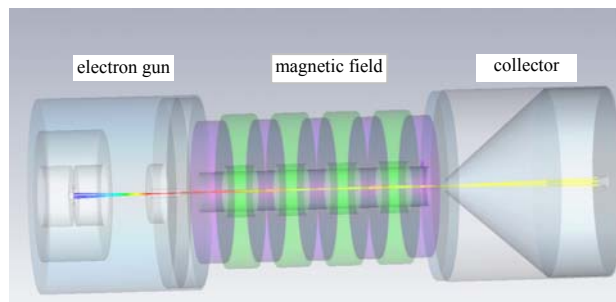


Fig.9 Electron optics system
图9 电子光学系统

磁场聚焦系统主要有线包磁场和永磁结构 2 种, 线包磁场体积太大, 因此太赫兹器件只能使用永磁聚焦系统。永磁聚焦系统分为均匀永磁系统和周期永磁系统 2 种, 均匀永磁系统适用于内径较大、噪声较低的情况, 而周期永磁系统适用于内径小、磁系统体积和重量都较小、杂散磁场较小的情况。由于太赫兹折叠波导行波管本身的尺寸较小, 因此使用周期永磁聚焦系统更符合实际情况。

太赫兹折叠波导行波管所使用的电子注很细, 电流密度非常大, 因此收集极需要使电子注完全发散, 不然电子注就有可能射穿收集极底部, 使得整个系统崩溃。同时由于收集极在收集电子的过程中要受到高速电子的轰击而发热, 高速电子的动能很大, 其打到收集极上后所产生的热量也很大, 因此需要考虑设计冷却系统。

按照 0.34 THz 折叠波导慢波结构的优化设计结果, 电子光学系统设计要求为: 工作电压 19 kV, 电流 6 mA, 电子注通道边长 0.16 mm, 电子注束腰半径约 80 μm 。根据此要求, 设计并加工了流通管进行测试, 如图 10 所示, 其中永磁聚焦系统的磁场峰值约 0.41 T(由工作电压、电流和电子注半径, 通过理论公式计算出布里渊磁场强度, 计算得到的周期永磁系统的磁场峰值约为布里渊磁场的 2 倍, 但实际使用的周期永磁系统的磁场峰值是计算值的 1.5 倍到 2 倍, 最后通过仿真软件进行优化, 得到实际使用的周期永磁系统的磁场峰值)。



Fig.10 Beam practice tube
图 10 流通管

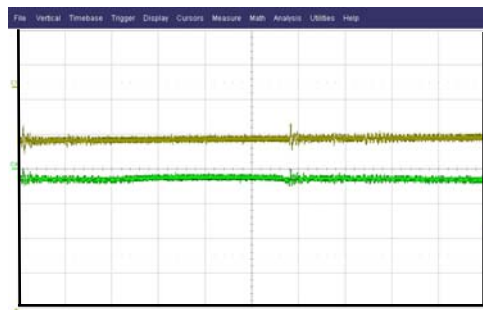


Fig.11 Waveform
图 11 测试波形

由于 0.34 THz 折叠波导行波管的电子注通道较小, 其对加工及装配焊接的要求非常高, 所制得的流通管在未对磁系统进行任何调整时, 电子注通过率非常低, 因此需要通过仔细调节磁场来提高通过率。使用的方法是旋转个别磁环和黏贴小磁片, 前者主要考虑到某些磁环可能因装配对中不好, 导致产生的磁场轴对称性差而采取的措施, 后者则主要针对磁场分布不理想, 包括轴对称性、磁场峰值大小以及分布等不理想进行的补偿。

最终测试得到的电流波形如图 11 所示, 其中上面的线为收集极电流波形, 下面的线为管壁电流波形。在工作电压 19 kV, 电流约 6 mA 的情况下, 电子注的通过率为 81.9%。

4 输入输出结构

0.34 THz 折叠波导行波管的输入输出结构由渐变波导与盒型窗结构 2 部分构成。渐变波导的主要作用是减小太赫兹波从标准波导过渡到慢波结构时的反射, 盒型窗结构的主要作用是保证 0.34 THz 折叠波导行波管的输入输出带宽和管内的真空。由于流通管所使用的磁环内径较小, 为保证装配精确度, 慢波结构需要与渐变波导一体加工, 这样渐变波导需尽可能的短, 因此渐变波导采用阶梯渐变波导结构, 而盒型窗的介质窗片可以考虑使用蓝宝石或者金刚石。

通过对 0.34 THz 折叠波导行波管慢波结构的冷损耗特性分析, 发现 0.34 THz 折叠波导行波管的冷损耗非常大, 达到 25 dB 以上, 相当于慢波结构中有一个分布式的衰减器。由于本文设计的 0.34 THz 折叠波导行波管的增益并不高(小于 20 dB), 因此设计方案可以不考虑再专门设计集中衰减器或切断式衰减器。在使用软件计算输入输出结构时, 需要将输入、输出结构及慢波结构一起计算, 要求这 3 部分组成的整体结构在 20 GHz 带宽内, 驻波比小于 1.2, 才能满足设计要求。

5 结论

0.34 THz 折叠波导行波管虽然只工作在太赫兹频段低端, 但通过模拟计算发现, 其对加工及装配的要求已经非常苛刻。因此如何通过合理设计来尽量减少其对加工及装配的要求, 不但考验着设计人员, 而且直接影响到太赫兹行波管能否继续健康发展。本文设计了一支中心频率 0.345 THz, 3 dB 带宽大于 10 GHz, 输出功率大于

20 mW 的太赫兹折叠波导行波管,并按照设计进行了流通管实验,测试得到电子注通过率大于 80%,这为太赫兹折叠波导行波管的进一步发展打下了良好的基础。

参考文献:

- [1] 张章. 太赫兹行波管的研究进展[J]. 激光与红外, 2012,42(3):250-257. (ZHANG Zhang. Research progress of THz traveling wave tubes[J]. Laser & Infrared, 2012,42(3):250-257.)
- [2] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, et al. Vacuum electronic high power terahertz sources[J]. IEEE on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):54-75.
- [3] Bhattacharjee S, Booske J H, Kory C L, et al. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2004, 32(3):1002-1014.
- [4] 王明红, 薛谦忠, 刘濮鲲. 太赫兹真空电子器件的研究现状及其发展评述[J]. 电子与信息学报, 2008,30(7):1766-1772. (WANG Ming-hong, XUE Qian-zhong, LIU Pu-kun. Review of THz Vacuum Electronic Devices and Development[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(7):1766-1772).
- [5] Tucek J C, Basten M A, Gallagher D A, et al. A 100 mW, 0.670 THz Power Module[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA: [s.n.], 2012:31-32.
- [6] Aksenchyk A V, Kurayev A A, Kirinovich I F. Folded waveguide TWT frequency characteristics in the range 600 GHz~3000 GHz[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA: [s.n.], 2010:461-462.
- [7] 徐翱, 周泉丰, 阎磊, 等. 0.22 THz 折叠波导行波管初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(11):2954-2958. (XU Ao, ZHOU Quan-feng, YAN Lei, et al. Initial experimental study on 0.22 THz folded waveguide TWT[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(11):2954-2958.)
- [8] 应一凡. 太赫兹技术在室内无线通信中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2011,7(7):1530-1533. (YING Yi-fan. THz Technology in Indoor Wireless Communications[J]. Computer Knowledge and Technology, 2011,7(7):1530-1533.)

作者简介:



徐 翱(1982-), 男, 武汉市人, 副研究员, 主要研究方向为毫米波及太赫兹真空电子学器件技术. email: xuao@vip.sohu.com.

周泉丰(1984-), 男, 四川省荣县人, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹真空电子学器件技术.

阎 磊(1984-), 男, 西安市人, 助理研究员, 主要研究方向为毫米波真空电子学器件技术.

胡 鹏(1985-), 男, 四川省绵阳市人, 助理研究员, 主要研究方向为毫米波真空电子学器件技术.

陈洪斌(1971-), 男, 四川省阆中市人, 研究员, 主要研究方向为毫米波及太赫兹真空电子学器件技术.