

文章编号: 2095-4980(2014)02-0166-05

0.22 THz 折叠波导行波管设计

周泉丰^{a,b}, 徐 翱^{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: 在一支 0.22 THz 折叠波导行波管样管的模拟设计和实验研究基础上, 对该样管进行了优化设计。对慢波损耗特性、慢波结构的尺寸冗余度进行了研究, 对结构加工进行了进一步的考虑, 对样管的实验研究进行了详细讨论并论述了新慢波结构的设计。采用 HFSS 软件结合大信号理论计算进行模拟, 结果表明, 折叠波导行波管的输出功率不低于 100 mW, 带宽不低于 5 GHz。

关键词: 太赫兹; 折叠波导行波管; 慢波结构; 增益; 带宽

中图分类号: TN124⁺.2

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0166

Study of designing 0.22 THz folded waveguide traveling wave tubes

ZHOU Quan-feng^{a,b}, XU Ao^{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 Physic, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A prototype 0.22 THz Folded Waveguide Traveling Wave Tube(FWTWT) is designed and studied by experiments. By the comparison between the experimental and simulated results, this 0.22 THz FWTWT is optimized and improved. The loss characteristics, Slow Wave Structure(SWS) dimension adjustment and the issues of manufacturing SWS are also studied. HFSS is adopted to study SWS parameters and a large-signal software is used to simulate its amplification. The results of 100 mW power output and 5 GHz of 3 dB bandwidth are obtained in this new design.

Key words: Terahertz; Folded Waveguide Traveling Wave Tube; Slow Wave Structure; gain; bandwidth

太赫兹辐射是指在 0.1 THz~10 THz 波段的电磁波。目前太赫兹在雷达、高速通信、深空探测、医学成像和安保检测等方面具有广泛应用前景, 但小型化、大功率、宽带宽的太赫兹源是制约太赫兹应用的瓶颈。折叠波导行波管(FWTWT)具有全金属化结构, 其慢波结构和输入输出匹配可整体加工, 因此折叠波导行波管的功率容量大, 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, 折叠波导行波管是小型化、大功率、宽带宽太赫兹源各类型中最具竞争力的一种^[1-6]。

太赫兹频段的折叠波导行波管由于工作频点高, 尺寸微小, 许多物理和工艺都需要进行新的验证和研究。而 0.22 THz 的电磁波位于太赫兹波段的低频段, 并且处于一个大气窗口, 因此研究 0.22 THz 折叠波导行波管不仅具有很强的应用价值, 而且是研究更高频段太赫兹折叠波导行波管的基础。

目前国内太赫兹折叠波导行波管的研究处于起步阶段, 中物院应用电子学研究所成功研制出了国内第一支 0.22 THz 折叠波导行波管, 实验测试结果表明, 输出功率大于 100 mW, 3 dB 带宽约 3.5 GHz。通过理论设计与实验结果的对比, 验证了理论设计方法和加工结构的正确性。在此基础上进行了优化设计, 进一步改进了结构加工要求, 设计了一支新的折叠波导行波管慢波结构, 其 3 dB 带宽不低于 5 GHz。

1 太赫兹折叠波导行波管慢波结构设计

折叠波导行波管的主要结构是慢波, 其结构如图 1 所示, 矩形波导沿着 S 形的路径弯曲延伸, 用 b 表示矩形波导的窄边, p 是一个

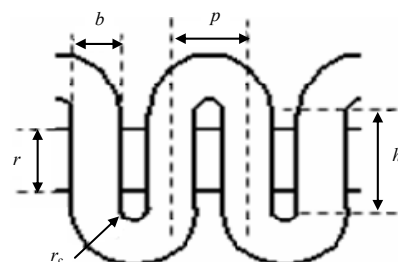


Fig.1 SWS of folded waveguide traveling tube
图 1 折叠波导行波管的慢波结构

半周期长度, r_c 是内半圆弧半径, h 是直波导段长度, r 是电子束通道半径, 并用 a 表示矩形波导的宽边, 图中未标注。

慢波结构的作用是为了让纵向传输的电磁波“减速”, 从而让电子束与电磁波同步。电子束与电磁波在电子束通道位置的矩形波导间隙发生相互作用, 电子束的能量传递给电磁波。从图 2 的模拟结果可知, 应选择基模 TE_{10} 与电子束相互作用, TE_{10} 模式的电场方向沿纵向与电子束方向平行, 中心区的电场分布比较均匀, 而其他几种模式的电场的最大值不集中在中心区域, 因此在模拟设计中使折叠波导行波管工作在 TE_{10} 主模。

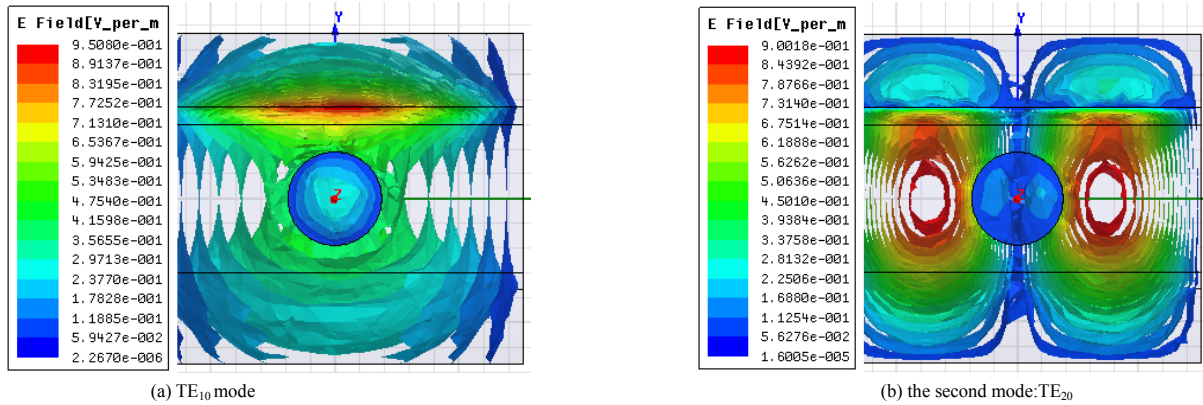


Fig.2 Two propagation modes simulated by HFSS

图 2 用 HFSS 模拟的折叠波导行波管中前 2 个模式的电场分布

在慢波设计中, 需要重点考虑色散、耦合阻抗和损耗 3 个特性。折叠波导行波管的慢波结构色散, 即每半周期的相移 β_n 可由以下未考虑波导偏转的阻抗特性变化和束流通道对色散的影响的公式初步确定^[7]:

$$\beta_n p = (2\pi L / \lambda) [1 - (\lambda / \lambda_c)^2]^{1/2} + (2n+1)\pi, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

式中: L 为电磁波在半个慢波周期中行进的路径长度; π 是源于电磁波在波导中的折返; n 表示周期性慢波结构中的第 n 次空间谐波数; λ 是电磁波工作频率的波长; λ_c 是矩形波导的截止波长。本文中的色散特性将用 V_p - f 图进行描述。在工作区域附近, 色散曲线越平整越好, 这样能够得到更宽的工作带宽。根据式(1), 还可以初步确定一些几何参数, 如矩形波导宽边 a ^[8], 然后用 HFSS 精确计算所需要的具体几何尺寸结构。

轴向上的耦合阻抗 R_c 用式(2)进行描述^[9]:

$$R_c = |E_z|^2 / (2\beta^2 P) \quad (2)$$

式中: E_z 为纵向的电场强度; P 是流经波导的功率流。电子束通道的尺寸较小, 用轴向上的 E_z 进行近似耦合阻抗计算。

损耗必须在结构设计之前确定, 损耗与铜材料的电导率和粗糙度均有关, 实际中需要用实验进行测试并验证。经电磁场仿真与实验的对比, 确定电导率为 3.2×10^7 S/m^[10]。

慢波的设计目的是确定 r, b, p 以及慢波总周期数等参数, 以得到目标增益和带宽。可以用如下方法进行模拟计算。a) 采用基于 PIC 的软件进行模拟计算, 如 MAGIC, CST 等, 其缺点是占用计算机资源多, 总设计周期时间长^[8]; b) 采用理论分析和电磁场仿真模拟相结合的方法, 确定色散特性和耦合阻抗等关键参数, 然后用大信号理论进行数值模拟, 这种方法速度快, 在微波段的行波管设计中采用较多, 得到的结果足够精确, 如美国的软件 CHRISTINE 1D^[11]。0.22 THz 折叠波导行波管的设计采用第 2 种方法。

3 0.22 THz 折叠波导行波管样管

最终样管的慢波结构参数如表 1 所示^[7]。

0.22 THz 折叠波导行波管的电子枪采用高压压缩比的皮尔斯电子枪, 电子束在行波管中采用周期永磁聚焦结构约束电子束的传输。电子枪工作电压设计为 14.9 kV, 引出电流 9 mA, 电子束半径 40 μ m。

调试永磁结构之后得到的样管流通率约为 43.3%。为了防止电子束长时间发热造成对慢波、永磁系统和收集极的破坏, 初步实验中采用重频脉冲信号进行实验及测试。测试现场图如图 3(a)所示, 逻辑框图如图 3(b)所示。功率计通过一个定向耦合器测量由返波管源产生并进入到行波管的功率大小, 经行波管放大后的电磁波功率信号由检波器测定并在示波器上显示, 频率测定则由谐波混频器进行测量和计算得到。系统测试时采用脉冲工作方式,

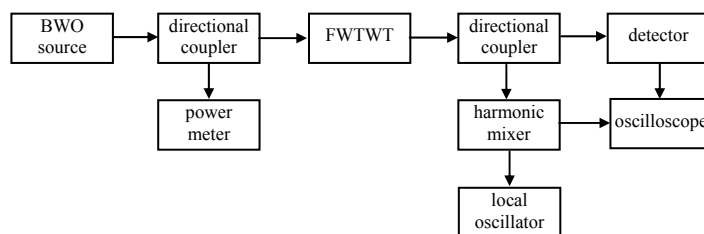
表 1 0.22 THz 折叠波导行波管样管慢波参数

parameters	value/mm
a	0.78
b	0.16
h	0.30
r	0.08
p	0.24

重复频率 10 Hz，脉宽 10 μ s，检波器经标定后测定输出波形，测量检测到的信号大小，再通过可变衰减器和定向耦合器的标定反推行波管放大器的输出信号大小。



(a) test system



(b) test logic diagram

Fig.3 Test experiment of the 0.22 THz FWTWT
图 3 0.22 THz 折叠波导行波管样管测试图

实验中最优化的电子枪工作电压为 15.2 kV，调节衰减器，稳定行波管的输入功率大小为 10 mW，该输入功率值与模拟设计中输入行波管放大器的功率值一致，测试得到最大增益 11 dB。增加输入功率到 20 mW 之后，输出功率为 252 mW，增益仍稳定在约 11 dB。为了得到最大带宽工作状态，调节电子枪工作电压等参数，得到的结果为最大增益不低于 10 dB，瞬时 3 dB 带宽为 3.5 GHz，如图 4 所示。此实验结果的 3 dB 带宽相对较窄，初步判定是由于电子束流通率不够造成的，理论设计中的流通率为 80%，3 dB 带宽不低于 5 GHz。用 3.7 mA 的电子束理论模拟结果如图 5 所示，3 dB 带宽约 4 GHz，工作电压的中心值偏离约 0.4 kV，而且增益也比测试结果高了约 2 dB。

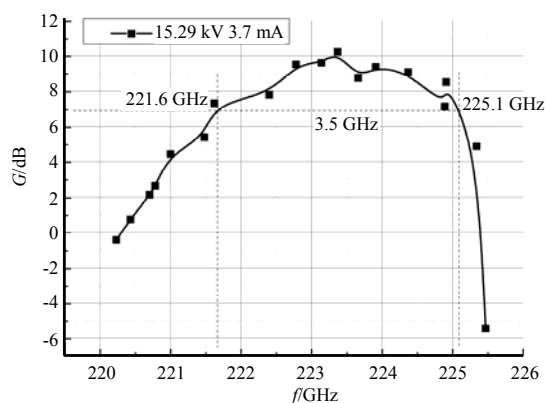


Fig.4 Experimental result of the 0.22 THz FWTWT
图 4 0.22 THz 折叠波导行波管样管测试结果

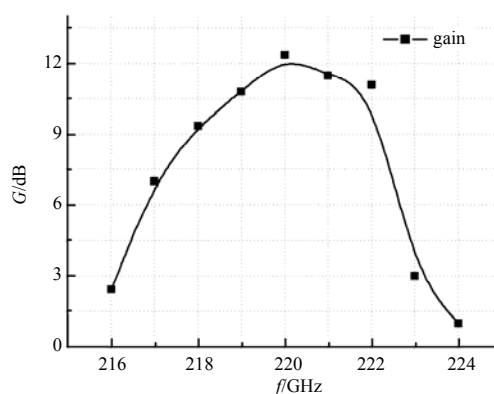


Fig.5 Simulation result of the 0.22 THz FWTWT
图 5 0.22 THz 折叠波导行波管模拟结果

实验与理论的偏差还有其他原因，目前判断原因有如下几点：a) 计算时采用的电子注是理想情况，而测试时电子注发散得比较厉害，从而导致输出功率和带宽变小；b) 慢波结构在微铣削完成之后需要有后处理过程，在慢波结构的后处理过程中尺寸需要进一步严格控制，尺寸的微小改变不仅会影响带宽和增益，还会影响行波管工作电压的中心值；c) 参考图 3(b)，行波管的输入输出功率测定分别在待测行波管前后，2 个定向耦合器与行波管之间还有 2 个输入输出窗，经测定输入输出窗造成的功率衰减约为 2 dB，因此考虑输入输出窗后，其增益和输出功率在实验和模拟对比中能够吻合起来。

4 0.22 THz 折叠波导行波管优化设计

针对 0.22 THz 折叠波导行波管样管初步试验结果以及理论分析，新行波管的优化设计中首先要考虑的问题是：在设计慢波结构时，必须保证在流通率低的情况下仍能得到较高的带宽。为此设计了一套全新的慢波结构，其参数如表 2 所示。

新设计的慢波结构在 4 mA 电子束流通过的情况下 3 dB 带宽为 5.5 GHz(如图 6 所示),同时可以看到,如果继续提高电子束流通过率,带宽会迅速增大。设计中也考虑了电子枪工作电压的冗余度,在 13.65 kV~13.85 kV 工作电压范围内,4 mA 电子束流对应的带宽均能保持在 5 GHz 以上。另外,新结构在考虑输入输出窗的影响之后增益仍有 12 dB 以上。

对折叠波导行波管的宽边 a 和窄边 b 尺寸变化 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 范围内进行了冗余设计,见图 7。工作电压随着 a 变大而降低,随着 b 的变大而升高。旧的 0.22 THz 折叠波导行波管实验结果的工作电压偏高,与慢波结构加工过程中 a 深度的精确控制,以及后处理中窄边 b 的扩大有关。在 a 和 b 的尺寸 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 冗余范围内,4 mA 的电子束流能够得到 5 GHz 以上的带宽。新慢波结构加工仍采用机械加工方式,采用成型刀加工,在慢波后处理过程中将严格控制尺寸的改变量在 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

新结构设计中还对电导率进行了考虑,模拟表明,在降低电导率到 $3\times 10^7\text{ S/m}$ 后,带宽几乎没有变化,只有增益相应减小了 1 dB,这是因为带宽的影响主要由色散曲线决定,而衰减则主要影响了行波管的增益。

表 2 0.22 THz 折叠波导行波管优化后的慢波结构参数

Table2 Parameters of the optimized 0.22 THz FWTWT	
parameters	value/mm
a	0.790
b	0.150
h	0.320
r	0.085
p	0.230

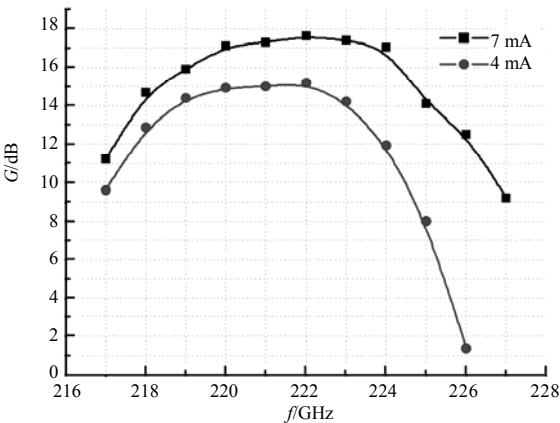


Fig.6 Design results of the optimized 0.22 THz FWTWT
图 6 新 0.22 THz 折叠波导行波管慢波优化设计结果

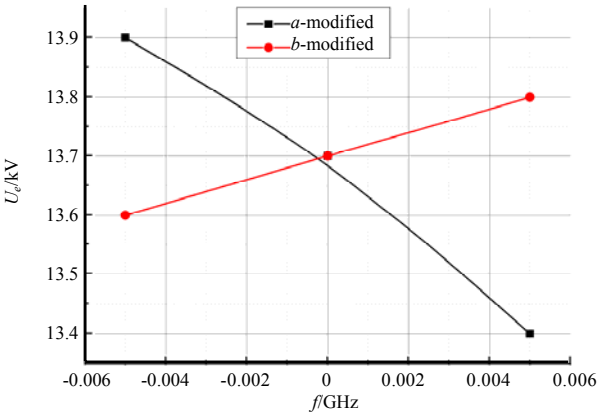


Fig.7 Simulation results of the adjustment capability of waveguide length and width
图 7 对矩形波导宽边 a 和窄边 b 进行冗余设计的模拟结果

5 结论

0.22 THz 折叠波导行波管中设计的关键在于慢波结构设计,该慢波设计中重点考虑了色散特性,耦合阻抗以及衰减损耗。国内第一支 0.22 THz 折叠波导行波管的研制成功表明,基于大信号理论的数值模拟仍适用于 0.22 THz 折叠波导行波管的慢波结构设计。实验结果的流通率并未达到设计值的 80%,目前流通率是提高该折叠波导行波管性能的瓶颈之一。一方面,需要在今后的研究中努力提高流通率,另一方面在太赫兹折叠波导行波管设计中,需要优先考虑流通率较低情况下带宽和增益参数。对慢波波导宽边和窄边的冗余设计表明,太赫兹折叠波导行波管的中心电压对波导尺寸十分敏感,尤其是宽边 a 的尺寸,在 0.22 THz 慢波结构加工和后处理过程中需要严格控制尺寸在 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 以内。针对实验和模拟研究,新设计了一支 0.22 THz 折叠波导行波管的慢波结构,4 mA 电子束流情况下能得到大于 5 GHz 的 3 dB 带宽。

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 Transactions on Plasma Science, 2004,32(3):1002–1014.
[4] ZHENG Rui-lin,CHEN Xu-yuan. Parametric simulation and optimization of cold-test properties for a 220 GHz broadband folded waveguide traveling-wave tube[J]. J. Infrared Milli. and Terahz. Waves, 2009,30(9):945–958.

- [5] 张长青,宫玉彬,魏彦玉,等. 亚毫米波折叠波导慢波结构的损耗特性研究[J]. 半导体光电, 2010,31(6):880-884. (ZHANG Chang-qing,GONG Yu-bin,WEI Yan-yu,et al. Investigation on loss characteristics of the sub-millimeter wave folded waveguide slow-wave circuit[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010,31(6):880-884.)
- [6] 徐翱,胡林林,阎磊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管部件设计与加工[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(9):2135-2140. (XU Ao,HU Lin-lin,YAN Lei,et al. Design and machining of components of 0.22 THz folded waveguide traveling wave tube[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2012,24(9):2135-2140.)
- [7] COLLIN R E. Foundations for microwave engineering[M]. New York:McGraw-Hill, 1992.
- [8] Young Ho Na,Sang Wook Chung,Jin Joo Choi. Analysis of a broadband Q band folded waveguide traveling-wave tube[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002,30(3):1017-1023.
- [9] Hutter R G E. Beam and Wave Electronics in Microwave Tubes[M]. New York:Van Nostrand, 1960.
- [10] 徐翱,胡林林,陈洪斌,等. 太赫兹折叠波导慢波结构 S 参数特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(4):968-972. (XU Ao,HU Lin-lin,CHEN Hong-bin,et al. Study S-Parameters Characteristic in THz Folded Waveguide Slow Structures[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2013,25(4):968-972.)
- [11] Booske J H,Converse M C,Kory C L,et al. Accurate parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter-wave traveling wave tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005,52(5):685-694.

作者简介:



周泉丰(1984-),男,四川省荣县人,助理研究员,博士,主要研究太赫兹电真空电子学器件技术.email:Zhouqf@163.com.

徐翱(1982-),男,武汉市人,副研究员,博士,主要研究太赫兹电真空电子学器件技术.

阎磊(1984-),男,西安市人,助理研究员,主要研究太赫兹电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,主要研究太赫兹电真空电子学器件技术.

陈洪斌(1971-),男,四川省阆中市人,研究员,主要研究太赫兹电真空电子学器件技术.

(上接第 161 页)

- [7] Menzel C,Rockstuhl C,Lederer F. Advanced Jones calculus for the classification of periodic metamaterials[J]. Phys. Rev. A, 2010,82(5):053811.
- [8] Strikwerda A C,Fan K,Tao H,et al. Comparison of birefringent electric split-ring resonator and meanderline structures as quarter-wave plates at terahertz frequencies[J]. Opt. Express, 2009,17(1):136-149.
- [9] Yu N,Genevet P,Kats MA,et al. Light propagation with phase discontinuities:generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011,334(6054):333-337.

作者简介:



潘学聪(1983-),女,河北省沧州市人,在读博士研究生,主要从事超材料在太赫兹波段电磁响应的研究.email:panxuecong06@mails.gucas.ac.cn.

鄂轶文(1988-),女,内蒙古包头市人,在读博士研究生,研究方向为太赫兹光谱分析和技术.

汪力(1956-),男,安徽省芜湖市人,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光物理、太赫兹电磁场与物质相互作用等研究.