2014年10月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

#### 文章编号: 2095-4980(2014)05-0639-05

# 0.22 THz 折叠波导返波管设计

蔡金赤<sup>1,2</sup>,胡林林<sup>2</sup>,马国武<sup>2</sup>,陈洪斌<sup>2</sup>,金 晓<sup>2</sup>,陈怀璧<sup>1</sup>

(1.清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2.中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 作为折叠波导家族的重要成员之一,折叠波导返波管无需种子微波源,具有可观的振荡功率输出,可在较宽频带内方便地进行电压调谐,在 THz 波段的紧凑型电真空器件中占有重要地位。介绍了中物院应用电子学研究所 0.22 THz 折叠波导的研究情况,并阐述整管设计的原理和理念。通过一维模型分析和三维宏粒子模拟校验,完成了调谐频宽 10 GHz,带宽内输出功率为 瓦级的折叠波导返波管的理论设计。

 关键词:
 太赫兹;折叠波导;返波管

 中图分类号:
 TN24

 文献标识码:
 A

doi: 10.11805/TKYDA201405.0639

# Development of 0.22 THz Folded Waveguide Backward Wave Oscillator

 CAI Jin-chi<sup>1,2</sup>, HU Lin-lin<sup>2</sup>, MA Guo-wu<sup>2</sup>, CHEN Hong-bing<sup>2</sup>, JIN Xiao<sup>2</sup>, CHEN Huai-bi<sup>1</sup> (1.Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
 2.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** As an important member in the family of Folded Waveguide, Folded Waveguide Backward Wave Oscillator(FWBWO) shows considerable output power and large tuning frequency bandwidth without requiring input power, thus making it a possible vacuum electronic device power source in terahertz regime of EM wave. The development of 0.22 THz FWBWO tube in Institute of Applied Electronics of CAEP is presented in this paper. The basic principle and concept of the design process are demonstrated. Through one-dimensional model analysis and three-dimensional Particle-In-Cell(PIC) simulation, the BWO tube with frequency bandwidth of 10 GHz and output power of watt scale is theoretical designed.

Key words: terahertz; Folded Waveguide; Backward Wave Oscillator

太赫兹频段的电磁辐射具有波长短,频带宽,对非极性分子不吸收,对生物大分子具有独特吸收峰等内秉特性,因此 THz 技术在精确雷达制导、高分辨透射成像、高速率空间通信、分子生物学研究等科研、实用领域具有重大的发展前景<sup>[1-2]</sup>。在 20 世纪研发应用较为成熟的电磁辐射源主要包括用真空、固体电子学的方法实现的射频微波源和用能级跃迁、光子学方法实现的红外和可见光光源,但在 0.1 THz~10 THz 频段留下了辐射源的空白。经过近二、三十年的发展,"太赫兹空白"得到了有效填充,目前常见的适应于工作在 0.1 THz~1 THz 的微波源主要包括基于半导体负阻特性的固态微波源和基于真空电子学的各种电真空器件<sup>[3]</sup>。利用折叠波导慢波线为高频结构的返波管器件具有较高束波耦合阻抗,较大的电子调谐带宽,良好的散热能力,紧凑、结实的机械外观和利用平面加工方法批量生产的潜力<sup>[4]</sup>,输出信号信噪比小,可作为太赫兹器件的标准源或者放大器的前级种子源,因此具有相当的研发价值和应用前景。

相对于研究比较广泛的基于带状电子注的平板型返波管,折叠波导返波管具有功率高,体积小,成本低,工 艺较成熟等优点。国外研究主要以韩国汉城大学对 0.1 THz 折叠波导返波管的研究为代表,其工作电压为 12 kV, 工作电流为 50 mA,拟输出 5 W 的功率<sup>[5]</sup>,首次在折叠波导加工中采用两步光刻电铸成型(Lithographie-Galanoformung-Abformung, LIGA)技术<sup>[6]</sup>。目前已完成电子枪热测和慢波线冷测,整管测试有待报告。国内的研 究主要以中电十二所为代表,已完成 0.1 THz 折叠波导返波管的理论设计,工作电压为 10 kV,工作电流为 12 mA, 拟输出 500 mW 的功率,调谐带宽为 20 GHz;对于 0.22 THz 折叠波导返波管的理论设计也正在开展,拟获得至 少 10 mW 的输出功率<sup>[7]</sup>。 中国工程物理研究院应用电子学研究所开展了 0.14 THz,0.22 THz,0.34 THz 折叠波导微波管的一系列研究, 并取得了一定的阶段性成果<sup>[8-9]</sup>。本文介绍 0.22 THz 折叠波导返波管的设计研究近况,其整管物理设计主要包括 高频互作用结构的设计、电子束流光学系统的设计、微波输能结构,并着重介绍设计思路和设计结果。

## 1 慢波结构的设计

该频段的折叠波导返波管的整管效率难以提高,因此设计时应尽可能优化效率,影响效率的内在因素如下:

1) 紧凑型微波管电子枪的工作电压大致为 10 kV, 而典型尺寸(可以保证精确度的尺寸)的折叠波导慢波结构 只能采用-2 次空间谐波(-1 次返波)与电子注同步互作用。慢波开束孔后, 其轴上耦合阻抗不到 1 Ω, 因此电子效 率低下。返波管电子调制方向和微波功率传输放大方向相反, 这正是返波管中反馈回路的由来。但正是这种束波 非同步的变化趋势, 造成了返波管效率低下。

2) 从振荡机理来看,返波管电流调制增强方向和微波功率传输放大方向相反,从而构成了返波管中反馈回路。然而,这种束波调制异向的关系,进一步限制了返波管效率的提升。

3) 折叠波导慢波线利用矩形波导基模 TE10 模式弯曲传输减缓电磁波的轴线传输速度,使其与远低于光速 传输的电子注的同步互作用成为可能。然而,随着工作频率达到太赫兹频段,电磁波在金属表面的趋肤深度急剧 减小,表面电流欧姆损耗显著增加。在 0.22 THz 高频附近,电磁波趋肤深度已可以和机械加工表面粗糙度(~0.2 μm) 相比拟,电磁壁损耗将进一步增强;另一方面,随着工作频率的提升,为了保证基模单模起振抑制高阶杂模,慢 波尺寸也必须相应减小,此时波导横截面的周长面积比增加,电磁波的传输损耗又将提升。高频损耗将显著降低 整管的输出效率。

综上所述,THz 波段的折叠波导返波管电子效率难以超过 1%<sup>[8-9]</sup>。为了尽可能优化效率,应在起振电流小于 阴极最大发射能力的前提下,尽可能缩减慢波线周期,这对于减小高频损耗十分有利,且可以有效减小电子在慢 波线上损耗。

0.22 THz 折叠波导慢波线的设计主要需要确定慢波线的结构尺寸和电子注参数,其理论研究工作主要包括建 立考虑损耗的折叠波导慢波线等效电路理论和建立考虑空间电荷效应、端部反射、相对论效应的折叠波导返波管 线性、非线性及时域分析理论,这些一维模型计算时间在 1 min 的量级。另外根据一些合理的近似对返波管线性 理论化简,发展了一套快速确定尺寸初值的解析方法。理论设计完成后,通过商业软件程序建立 PIC 数值模型, 对理论设计进行验算,发现模拟输出功率和振荡频率都吻合较好。基于 PIC 模型对电压优化微调后,得到折叠波 导慢波线的最终设计尺寸。理论模型的计算结果如表 1 所示,图 1 为非线性理论给出的工作电流超过起振电流后 返波振荡频率和效率的变化曲线,图 2 为 PIC 模拟计算给出的归一化电压随时间变化的曲线和傅里叶分析结果。



Fig.1 Frequencies and efficiencies of BWO varying with operating currents 图 1 返波管输出的微波频率和效率随工作电流的变化曲线



可以看到,通过慢波线的设计,在通过的电子束的参数为理想情况下,可以实现 0.22 THz 电磁辐射,其输出功率约为 2 W。

# 2 束流光学系统的设计

折叠波导慢波线的结构设计对电子注参数同时提出了要求,这样的圆形电子注需要通过 O 型电子束流光学系统来产生、传输和收集,分别对应皮尔斯收敛电子枪、布里渊磁约束和降压收集极三大部分。

在电子枪的设计过程中,考虑到慢波线束孔内电子注电流密度高达 110 A/cm<sup>2</sup>,而目前阴极加工能提供的最 大阴极电流密度为 5 A/cm<sup>2</sup>,因此必须采用收敛性圆对称电子枪,面压缩比约为 20~30;漂移段磁聚束方面,电 子枪采用无磁收敛型电子枪,同时为了兼顾磁系统体积和最优化束流的横向运动,最终选用完全磁屏蔽的均匀布 里渊磁聚束方案。和平面阴极暴力聚束的束流光学系统比,该方案可以工程实现,但限制了返波管的电压调谐带 宽,在初步研制阶段,带宽设定为 10 GHz。由于电子效率不高,进入收集极的电子注能散较小,可以用单级降 压收集极回收大部分电子能量,同时提高整管工作效率并降低收集极冷却的压力。基于球型二极管限制电流的皮 尔斯电子枪的基本工作原理和傍轴电子注传输的线性近似分析,在基于洛伦兹方程和麦克斯韦方程的前提下,推 导得出分析束流光学系统的一维模型,利用该模型可以比较快速确定系统关键物理尺寸的初值,继而开展后续的 数值计算与优化。针对低导流系数皮尔斯电子枪的热初速效应分析,得出该效应对该束流包络成型影响显著的结 论,由此提出一套综合设计小尺寸低导流系数束流光学系统的方法:a)首先根据一维模型,根据慢波线的要求, 快速确定电子束流光学系统的基本物理参数,注意到此时没有考虑聚焦极设计误差、阳极孔球差效应、发射初速 度离散、电子注非傍轴等因素,因此只能为后续设计提供初值;b)根据一维模型导出的枪区注边缘电位,用静 电学的方法确定聚焦极的形状,然后利用程序 ORION 检验聚焦极设计,此时可以将各种物理因素完整考虑,并 针对计算结果对电子枪尺寸作进一步优化,最后用 CST 等商业仿真软件进行 PIC 模拟或者轨迹模拟验证;c)利

用理想电子束的布里渊磁场位型计算模拟电 子枪输出束流在慢波线传输段的传输情况, 得到平稳聚束磁场,为了抑制高频起振后的 高频散焦,实际磁场可以比平稳聚束磁场略 大,然后用静磁学设计轴对称永磁铁、极靴 系统,使计算的轴线磁场分布逼近目标磁场 位型,并用商业仿真软件加以评价;d)考虑 到电子效率不高,动态能散不大,可以直接 利用数值程序给出的漂移段出射电子注设计 降压收集极,设计时,依然可以采用一维理 论给出的结构为基础进行过程优化。

根据上述步骤,完成了 0.22 THz 折叠波



Fig.3 Beam transportation in electron guns in 0.22 THz folded waveguide BWO 图 3 0.22 THz 折叠波导返波管电子束在电子枪中聚束情形

导返波管的电子束流光学系统的设计。图 3 给出了电子束在电子枪中的聚束情况,图 4 给出了磁系统的结构和轴线上磁场分布情况。



Fig.4 Layout for magnetic system and its magnetic induction along axis 图 4 磁系统布置和磁场位型图

# 3 输能结构的设计

从前面的慢波线分析可知,理想返波管其微波输出是在电子入口端,在电子出口端需要接匹配阻抗。原则上 讲,需要在慢波系统的两端都做到慢波模式的无反射。对于一个任意周期慢波结构,这样的耦合结构设计一般是 复杂的。端部模式反射的存在对返波管功率输出会有不利的影响,而且足够的反射可能导致行波自激振荡的发生, 但在端部反射不太强时,这2个效应都很不显著。折叠波导慢波结构是由矩形波导结构蜿蜒而成,尽管存在弯曲 耦合、小孔耦合等不均匀性,但对于上述设计的慢波结构,其慢波模式波阻抗和相同横截面的均匀直波导波阻抗 有98%相似度,因此设计时两端均按直波导 TE10模式无反射为目标进行设计,如果反射系数小于 0.1,慢波模 式的反射系数也可以控制在 0.1 左右。

微波功率引出结构主要分为波导线性过渡和非常规盒型窗。非常规盒型窗具有加工焊接方便,结构尺寸精确 度容易保证的特性,被选为微波窗的设计方案,窗片材料采用蓝宝石。0.22 THz 折叠波导返波管的盒型窗结构和 反射系数曲线如图 5 所示,其工作带宽拟为 10 GHz。





另外,对返波管终端吸收负载作了一些模拟计算,开展了一些衰减瓷材料电参数测定方法的研究工作。计算 时采用尖劈状衰减瓷,可以让微波在工作带宽内反射系数小于 0.1。

#### 4 结论

目前,0.22 THz 折叠波导返波管研制的物理、机械设计工作已基本完成,即将开展电子束流光学系统的实验研究工作。误差分析指出,电子枪装配、磁系统装配、电子磁系统位置调谐等的精确度控制将决定束流通过率的高低,保证足够的束流通过率是出波的必要条件。由于 0.22 THz 折叠波导返波管的束孔直径不足 0.2 mm,其慢波线可采取精密数控高速铣方法进行加工,这种机加工的尺寸精确度和表面光洁度基本满足设计要求。为了以后更高频率管型的研制和工程化样管作准备,后续可能开展深紫外光刻电铸成型(UV-LIGA)、深度离子刻蚀等平面加工方法的调查研究和工艺摸索。另外,考虑到该返波管需要连续波工作,后续可能会加入水冷。

# 参考文献:

- [1] LIU Sheng-gang. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006,8(1):7-12.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Tran. Microwave Theory and Tech., 2002,50(3):910-924.
- [3] Gallerano GP, Biedron S. Overview of terahertz radiation source[C]// Proc. FEL Conference.2004:216-221.
- [4] Bhattacharjee S,Booske J H,Kory C L,et al. Folded waveguide traveling-wave tube source for terahertz radiation[J]. IEEE Trans. on Plasma science, 2004,32(3):1002-1012.
- [5] FENG Jin-jin, REN Da-peng, LI Han-yan, et al. Study of high frequency folded waveguide BWO with MEMS technology[J]. Tera. Sci. Technology, 2011,4(4):164-178.
- [6] Srivastava V. THz vacuum microelectronic devices[J]. Journal of Physics:Conference Series, Colaba, Mumba, 2008, 114(1): 1-10.
- [7] 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 Quan-feng,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.)
- [8] 徐翱,周泉丰,阎磊,等. 0.34 THz 折叠波导行波管设计及流通管实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2): 153-157.(XU Ao,ZHOU Quan-feng,YAN Lei,et al. Design for 0.34 THz folded waveguide TWT and runner pipe experiment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):153-157.)
- [9] 雷文强,蒋艺,胡林林,等. 0.14 THz 折叠波导行波管的设计与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3): 334-338. (LEI Wen-qiang,JIANG Yi,HU lin-lin,et al. Design and experiment for 0.14 THz Folded Waveguide Traveling Wave Tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):334-338.)

## 作者简介:



**蔡金赤**(1987-),男,四川省南充市人,博 士,主要致力于太赫兹频段的电真空器件的研 究.email:caijinghinol@163.com. 胡林林(1979-),男,湖北省荆州市人,硕士,助理研究员,主要从事高功率微波器件、大功率 THz电真空器件及信号测量方面的研究.

**马国武**(1981-),男,四川省凉山彝族自治州人,硕士,助理研究员,主要从事高功率微波器件、大功率毫米波器件研究.

陈洪斌(1971-),男,重庆市丰都县人,博士,研究员, 主要从事毫米波和太赫兹波器件的研究. **金** 晓(1969-),男,兰州市人,博士,研究员,主要从事高功率微波技术方面的研究.

**陈怀璧**(1964-),男,江苏省海安县人,教授,博士生导师,研究领域主要涉及射频加速器高频结构、高功率微波器件、热阴极微波电子枪以及在高压高功率系统中的场击穿等.