

文章编号: 2095-4980(2013)01-0038-05

345 GHz 微折叠波导慢波结构参数分析

张 芳^{1,2}, 董志伟^{1,2}, 杨温渊^{1,2}, 董 烨^{1,2}

(1.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2.中国工程物理研究院 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要:借助微机电加工技术(MEMS 技术)研制的微折叠波导行波管(FWG-TWT)太赫兹辐射源, 具有紧凑、小型、宽带以及高功率的特点。本文对 345 GHz 微电真空折叠波导慢波结构进行了结构参数的规律分析和初步优化设计。基于小信号理论设计的慢波结构的初步结构参数, 采用三维 PIC 软件仿真并优化, 研究了电子参数、几何结构参数、磁场参数与增益之间的关系, 对折叠波导慢波结构的设计具有一定的参考意义。

关键词:太赫兹; 折叠波导行波管; 慢波结构; 电子束

中图分类号: TN124

文献标识码: A

Parameters analysis of 345 GHz micro-electronic vacuum Folded Waveguide Traveling-Wave Tube slow wave structure

ZHANG Fang^{1,2}, DONG Zhi-wei^{1,2}, YANG Wen-yuan^{1,2}, DONG Ye^{1,2}

(1.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

2.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: As micro-vacuum electron devices based on Micro-Electro-Mechanical Systems(MEMS) technology for terahertz radiation sources, Folded Waveguide Traveling-Wave Tube(FWG-TWT) amplifiers have such characteristics as compact structure, great bandwidth, high power and etc. According to 345 GHz vacuum micro-electronic folded waveguide slow wave structure, its theory and design method are studied. Preliminary structure parameters are firstly determined by the linearity analysis theory, and then the model is simulated in 3-D PIC software, and the structure sizes are optimized. The relations between TWT gain and electrical parameters, geometry parameters, magnetic parameters are studied, which is helpful for the design of folded waveguides slow wave structure.

Key words: terahertz; Folded Waveguide Traveling-Wave Tube; slow-wave-structure; electron beam

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率从 0.1 THz 到 10 THz 的电磁波, 它介于技术发展相对成熟的微波毫米波和红外可见光之间, 处于宏观理论向微观量子理论的过渡区。分别从低频段采用电子学途径和高频段采用光子学途径向太赫兹波段拓展是进行太赫兹产生研究的 2 个途径。尤其随着微细加工技术、材料科学以及真空电子学的不断进步, 利用电子学途径, 借助微机电系统技术(MEMS)从微波向太赫兹低端(0.1 THz~3 THz)推进以获取宽带太赫兹辐射源已经成为当前国际太赫兹研究的热点之一^[1-3]。

研究质量小、结构紧凑、中低电压(几十千伏量级)、宽带($\Delta f / f$)、功率为瓦量级的微电真空太赫兹行波管器件是太赫兹信号放大链中的一项必需任务。折叠波导行波管以其突出的特点引起了广泛关注和研究, 它由全金属构成, 热稳定性好, 功率容量大, 带宽较宽, 色散关系比较平坦^[4-6]。本文将针对 345 GHz 折叠波导行波管慢波结构, 进行结构参数的初步设计和规律性研究。

1 模型与仿真条件的确定

慢波结构(即高频结构)是行波管的核心部件, 通过束-波相互作用机理, 把电子束的能量转化为电磁场的能量,

收稿日期: 2012-12-11; 修回日期: 2012-12-26

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术研究中心项目(T2012-010209 和 T2012-010509); 国家高技术发展计划资助项目

对行波管的工作频率、带宽、输出功率和增益等参数起到决定性的作用^[7-9]。折叠波导慢波结构如图 1 所示, a 为折叠波导宽边长度, b 为折叠波导短边长度, h 为直波导段长度, p 为折叠波导慢波结构的半周期长度, D 为电子束通道孔径。基于小信号理论, 可初步设计 345 GHz 慢波结构的参数模型, 之后必须通过三维 PIC 程序数值模拟, 研究慢波结构的尺寸、电子参数、磁场参数等与器件性能的非线性关系, 从而进行结构参数的优化和器件性能的高频规律研究。模型仿真参数包括: 束流 15 mA, 束压 18.6 kV, 输入高频电磁场信号功率为 2.5 mW。

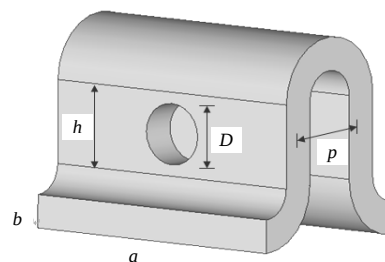


Fig.1 One period of FWG slow wave structure
图 1 单周期折叠波导结构示意图

高性能模拟仿真工作, 能有效地缩短器件开发周期, 节省资金, 实现最优化。大量有效的数值模拟结果, 有利于更好地研究器件的机理及其相关物理问题, 为试验、加工等后续环节服务。由于带电粒子与电磁场相互作用问题的复杂性, 无法使用解析方法来解决, 必须依赖于精确而强大的三维数值模拟工作。模拟过程中, 应该考虑计算参数, 包括网格数目、宏粒子数目和监控时间的选择, 应该平衡计算消耗(计算时间和计算内存空间)和计算精确度的关系。网格和粒子数与增益的关系如图 2、图 3 所示。

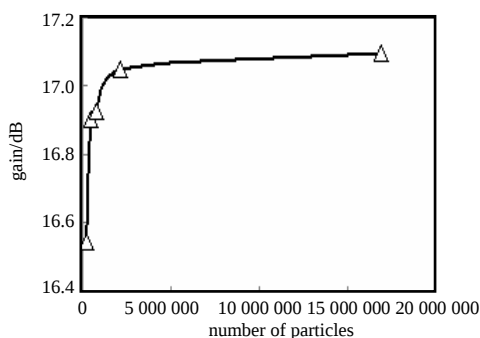


Fig.2 Gain vs. number of particles
图 2 增益随宏粒子数的变化曲线

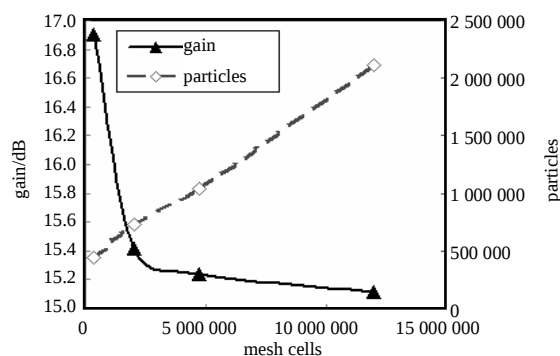


Fig.3 Gain/number of particles vs. mesh cells
图 3 增益和粒子数随网格数的变化曲线

总体上说, 原则上应该使阴极表面发射点足够多, 空间宏粒子的数目足够密, 使得电子束进入的每个网格都有相当数目的宏粒子; 剖分网格也应该足够多, 这样使得数值解足够准确^[4]。而计算时间随网格数和粒子数的增加而延长, 数值模拟所需内存空间也随网格数目和粒子数目的增加而增大, 则需综合平衡计算消耗和计算精确度。从图 2 中看出, 宏粒子数大幅度增加时, 增益增加并趋于稳定。从图 3 中看出, 随着网格数的增加, 增益减小并趋于稳定。则应该选择合适的网格密度和阴极发射点密度, 增益在该设置时变化趋势平缓。

2 波导材料为 PEC 时的慢波结构规律

基于小信号理论设计的慢波结构初步模型, 考虑了足够的宏粒子数和剖分网格密度, 研究器件的增益随电子参数(束压、束流密度、能散度)、尺寸参数(波导窄边 b)、磁场参数、周期数等的变化规律, 如图 4~图 13 所示, 采用折叠波导周期数为 50 个。为了有效地研究折叠波导慢波结构的机理及其物理规律, 首先设置折叠波导材料为完纯导体(Perfect Electric Conductor, PEC), 即先不考虑电磁信号电导率损耗, 从而研究慢波结构的高频特性。

针对各图中曲线的分析如下。

- 1) 如图 4 所示, 电子束和电磁场的同步电压为 18.6 kV, 束波同步条件是束-波有效互作用的前提。
- 2) 如图 5 所示, 折叠波导窄边 b 的最佳取值为 0.085 mm, 与理论计算规律相符。耦合阻抗是包含变量 b 的函数, 所以 b 的取值直接决定增益的大小。
- 3) 为考虑器件带宽, 如图 6 所示, 50 个周期慢波结构的 3 dB 带宽约为 15 GHz, 频率范围为 340 GHz~355 GHz。
- 4) 如图 7 所示, 束流密度增加时, 增益增大, 因为束流密度增加, 耦合参数增大, 束-波互作用增强, 增益增加。
- 5) 如图 8 所示, 因为束-波互作用的面积增大了, 增益随束流横截面面积的增大而增大。结合图 7 和图 8, 互作用面积和束流密度共同影响增益的大小, 对于束流密度而言, 束流密度增大, 增益增加; 而束流不变, 但束-波互作用面积增加, 束流密度是相对减小了, 但器件增益存在增加的趋势, 主要因为互作用面积的因素占优。

6) 设置阴极电子在一定的角度 ($0, Angle$) 范围内随机发射。从图 9 中可以看出, 增益随发射角度范围的增大呈现先增后降的趋势。曲线上升的部分是因为, 电子以一定的发射角度发射, 束流在传输过程中出现波动, 相对于零发射角时, 束流在空间占有体积增大, 束-波相互作用空间增大, 从而使得增益相对增加。曲线下降是因为, 当电子发射角度过大, 束流会有部分打在管壁上, 束-波互作用的电流减小, 增益下降。

7) 为了考虑电子枪产生的电子存在一定散度 ($Energyspread$) 的情况, 调整阴极发射电子能量在 $(E - Energyspread / 2, E + Energyspread / 2)$ 之间随机发射, 电子中心能量为 E 。从图 10 可以看出, 能散度越大, 发射电子的能量范围跨度越大, 增益越小。

8) 为了考虑器件的功率水平及其功率工作范围, 如图 11 所示, 调整注入的电磁波信号功率, 当信号功率小于 0.25 W 时, 增益不变, 为线性小信号增益; 之后随着输入信号功率的增加, 增益减小。

9) 为了考虑器件对聚焦磁场的要求, 如图 12 所示, 随恒定轴向磁场幅值的增加, 增益先增后降。聚焦磁场值较小时, 磁场对于电子束的会聚力不足以克服电子束的发散力, 束流会有部分打在管壁上, 增益很小; 随着磁场增大, 打在管壁上的电子减少, 增益增加; 当束流几乎没有打在管壁上, 其束流占据的空间最大时, 增益最大; 进而随着磁场的增加, 束流占据空间减小, 但减小的幅度有限, 则增益有缓慢减小并趋于稳定的趋势。

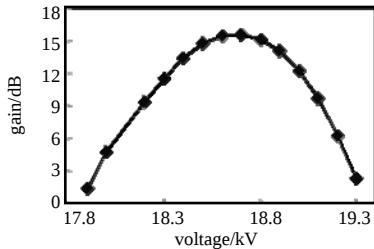


Fig.4 Gain vs. voltage

图 4 增益随束压的变化曲线

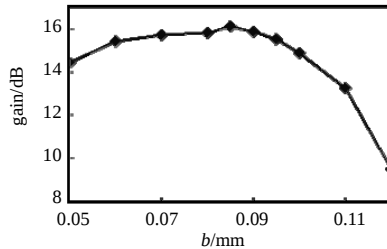
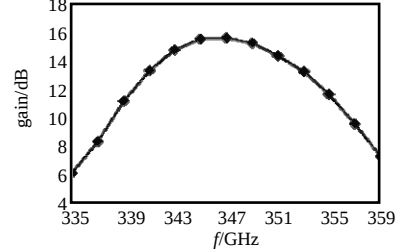
Fig.5 Gain vs. waveguide dimension b 图 5 增益随折叠波导窄边 b 的变化曲线

Fig.6 Gain vs. frequency

图 6 带宽

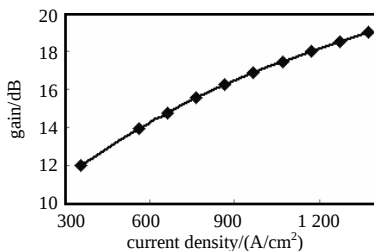


Fig.7 Gain vs. current density

图 7 增益随束流密度的变化曲线

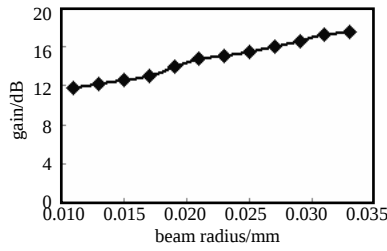


Fig.8 Gain vs. beam radius

图 8 增益随束-波相互作用面积的变化曲线

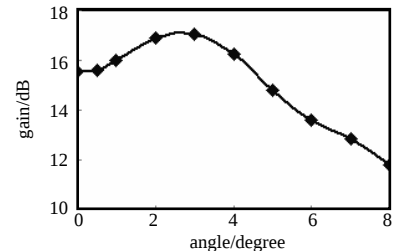


Fig.9 Gain vs. electron's emitting angle

图 9 增益随电子初始发射角度的变化曲线

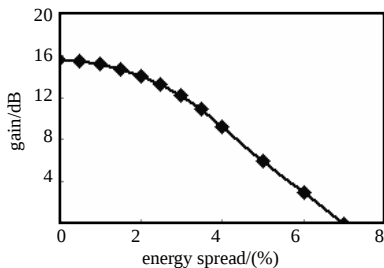


Fig.10 Gain vs. beam energy spread

图 10 增益随束流能散度的变化曲线

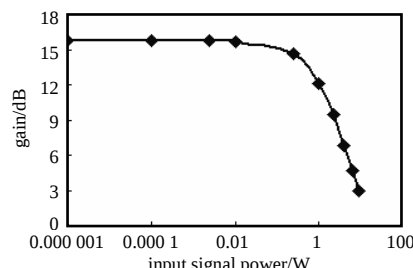


Fig.11 Gain vs. input signal power

图 11 增益随输入信号功率的变化曲线

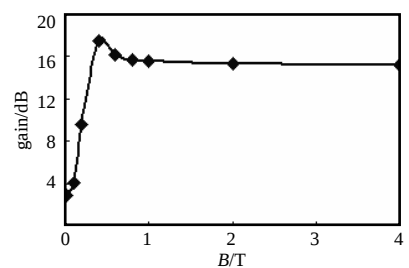


Fig.12 Gain vs. magnetic flux density

图 12 增益随磁感应强度的变化曲线

3 波导材料为铜时的慢波结构规律

针对频率为 345 GHz 的折叠波导慢波结构, 器件尺寸在亚毫米甚至更低的量级, 电磁信号在折叠波导中传播, 电导率损耗不容忽视, 如图 13 所示。设置折叠波导慢波结构的材料属性为铜的电导率参数, 考虑到加工粗糙度的影响, 选择电导率为 $1.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, 观察增益随束压、频率和周期的变化, 如图 14~图 16 所示。图 13~图 15 中采用折叠波导周期数为 50 个。

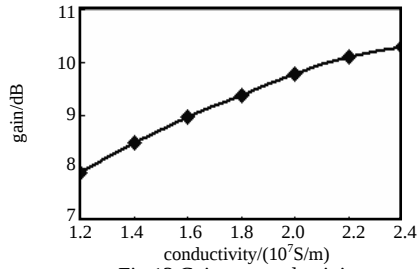


Fig.13 Gain vs. conductivity

图 13 增益随电导率的变化曲线

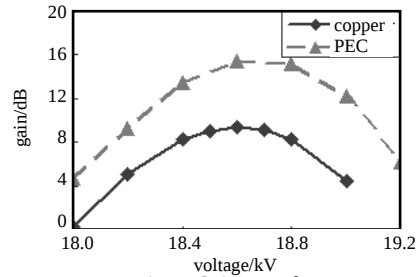


Fig.14 Gain vs. voltage

图 14 增益随束压的变化曲线

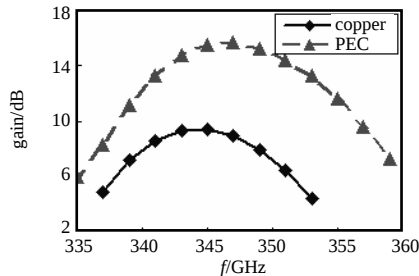


Fig.15 Gain vs. frequency

图 15 带宽

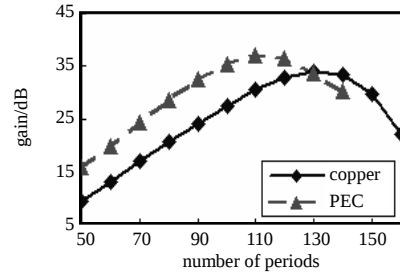


Fig.16 Gain vs. FWG-TWT periods

图 16 增益随周期的变化曲线

针对各图中曲线分析如下。

1) 如图 13 所示, 电导率的取值对增益的影响很大, 随着波导材料电导率的增大, 增益上升, 并有趋于饱和的趋势, 当波导材料为 PEC 时, 增益达到最大值 15.7 dB。折叠波导应该选择高导电率的材料。

2) 如图 14 所示, 通过观察 2 条曲线的间距, 相对于波导材料为 PEC 的结果, 波导为铜材料时, 增益至少低 5 dB, 这主要是由电磁信号的电导率损耗引起的。当波导材料为铜的电导率 1.8×10^7 S/m 时, 同步电压仍为 18.6 kV。

3) 如图 15 所示, 波导材料为 PEC 时, 3 dB 带宽约为 15 GHz, 范围为 340 GHz~355 GHz。波导材料电导率为 1.8×10^7 S/m 时, 3 dB 带宽约为 12 GHz, 范围为 339 GHz~351 GHz。有限电导率的引入使得带宽减小, 则需要选择电导率高的材料。

4) 为了考虑慢波结构的加工长度及其所能达到的最大增益, 如图 16 所示, 调整折叠波导的周期数, 当周期增加, 增益先增后降, 曲线上升部分是因为随着周期数增加, 束-波相互作用的长度加长, 增益增加。而周期过长, 束-波相互作用产生了过群聚现象, 增益下降。波导材料为 PEC 且增益最大为 37 dB 时, 此时折叠波导为 110 个周期数; 波导材料为铜且增益最大为 32 dB 时, 此时折叠波导为 130 个周期数。可以看出, 在曲线上升区, 波导材料为 PEC 的器件增益要比铜材料的增益至少大 5 dB, 相对于 PEC, 材料参数为铜时, 即存在电磁信号的电导率损耗时, 增益饱和点向后推迟了。

结合实际, 设计 345 GHz 折叠波导慢波结构时, 选定磁场峰值为 0.3 T, 电导率为 1.8×10^7 S/m, 能散度为 0.5%, 得到折叠波导最佳工作长度为 130 个周期, 增益为 28.9 dB, 输入输出信号图和束流相空间图如图 17、图 18 所示。从相空间图 18 可以看出, 初始发射电子能散度为 0.5%, 能量范围为 18 553 eV~18 647 eV。通过束-波相互作用, 能量减少的电子多于能量增加的电子数目, 电子总动能的减少转换为电磁场能, 使得电磁信号放大。

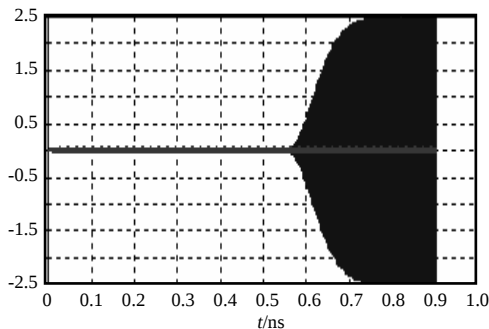


Fig.17 Input and output signal

图 17 输入输出信号

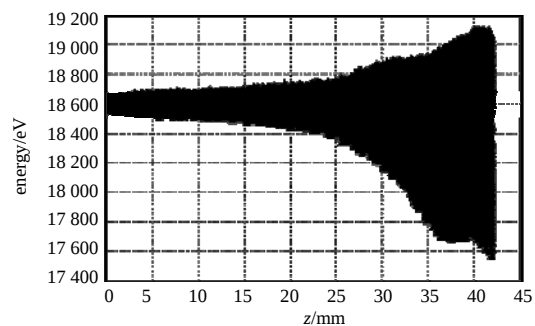


Fig.18 Phase space of beam

图 18 粒子的相空间图

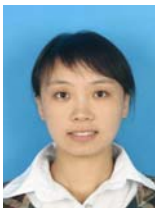
4 结论

首先通过小信号理论初步确定了折叠波导慢波结构的尺寸与工作参数,然后通过 CST 软件仿真优化各参数,并观察电子参数、结构参数、磁场参数与增益之间的变化规律。研究发现:1) 模型仿真之前,应选定模型的网格密度和宏粒子数,对数值模拟结果有总体的评估;2) 小信号理论对慢波结构进行初步的参数设计,然后需要通过数值模拟手段进行参数优化,如工作电压、折叠波导窄边 b 等;3) 通过数值模拟,分析了各参数(包括束压、 b 、束流密度、束波相互作用面积、磁场、输入信号功率、电子发射度、能散度、电导率等)变化对于增益的影响,仿真发现各参数变化对增益影响很大。

参考文献:

- [1] Khanh Nguyen,Lars Ludeking,John Pasour. Design of a high-gain wideband high-power 220-GHz multiple-beam serpentine TWT[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey,California,USA:[s.n.], 2010:23–24.
- [2] John H Booske,Richard J Dobbs,Colin D Joye. Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):54–75.
- [3] Kory C,Ives L,Read M,et al. W-band MEMS-based TWT development[C]// Fifth IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey,California, USA:[s.n.], 2004:88–89.
- [4] 蔡军. W 波段折叠波导慢波结构的研究[D]. 济南:山东大学, 2006. (CAI Jun. Research on W-band folded waveguide slow wave structure. Jinan:Shandong University, 2006.)
- [5] Gilmour A S. Principles of Traveling Wave Tubes[M]. Boston, USA:Artech house, 1994.
- [6] Sharma R K,Sharma A K,Pant B D,et al. Design and development of 100 GHz Folded Waveguide TWT[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, California, USA, 2010:505–506.
- [7] 陈樟,王亚军. 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构设计及加工[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):300–302. (CHEN Zhang,WANG Yajun. Design and manufacture of 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube slow wave structure[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):300–302.)
- [8] 董烨,董志伟,杨温渊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管放大器理论分析与数值模拟[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):313–319. (DONG Ye,DONG Zhiwei,YANG Wenyuan,et al. Theoretical analysis and numerical study of 0.22 THz FWG-TWT[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):313–319.)
- [9] 张芳,董志伟,董烨. 140 GHz 多束折叠波导行波管仿真分析[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(4):989–992. (ZHANG Fang,DONG Zhiwei,DONG Ye. Simulation of 140 GHz multi-beam folded waveguide traveling-wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(4):989–992.)

作者简介:



张 芳(1984–),女,河北省保定市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为太赫兹源器件理论分析与数值模拟.email:fangzhang328@163.com.

董志伟(1962–),男,河北省滦县人,博士,研究员,研究方向为高功率微波技术.

杨温渊(1973–),女,山西省平遥县人,副研究员,研究方向为高功率微波器件理论与数值研究.

董 烨(1981–),男,陕西省西安市人,硕士,助理研究员,研究方向为高功率微波技术、全电磁粒子模拟方法设计及应用.