

文章编号: 2095-4980(2018)01-0027-04

太赫兹FWG-TWT电子光学系统的数值模拟验证

张 芳¹, 董志伟¹, 陈洪斌², 周泉丰², 束小建¹

(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 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 结合实验模型, 对0.22 THz折叠波导行波管(FWG-TWT)的电子光学系统进行数值模拟验证。首先对电子枪的工作机制进行细致研究和仿真验证, 然后对电子光学系统(包括电子枪和周期永磁聚焦结构两部分)进行一体化建模, 结合实际, 合理设置仿真模型的工作参数及边界条件等。分析影响电子注流通率的关键因素, 调整结构参数和束流参数, 提高电子注的直流流通率。

关键词: 太赫兹; 折叠波导行波管放大器; 电子光学系统; 电子枪; 周期永磁聚焦系统

中图分类号: TN102

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0027

Simulation and verification of the optics system of micro-electronic vacuum FWG-TWT

ZHANG Fang¹, DONG Zhiwei¹, CHEN Hongbin², ZHOU Quanfeng², SHU Xiaojian¹

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

2.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For 0.22 THz micro-electric vacuum Folded Waveguide Traveling Wave Tube(FWG-TWT) amplifier, the model of whole electronic optics system for experiment is simulated. First of all, electron gun's working mechanism is analyzed and verified by simulation. Then the whole electronic optics system (including electron gun and periodic permanent magnetic focusing structure) is modeled. Combined with actual experimental conditions, the operating parameters and boundary conditions of the whole electronic optics system are set up properly for simulation. The key factors influencing the passing rate of electron beam are analyzed, and the structural parameters and beam parameters of electronic optics system are adjusted to improve electron beam's DC passing rate.

Keywords: terahertz; Folded Waveguide Traveling Wave Tube amplifier; optics system; electron gun; periodic permanent magnet focusing system

太赫兹的独特特性和特殊地位决定了其在基础科学、材料研究、生物医学、军事以及国家公共安全等众多领域都具有非常重要的应用前景, 而缺乏稳定、相干的太赫兹辐射源严重制约着太赫兹的研究、应用和发展。对于高功率要求而言, 真空电子学器件是大功率太赫兹辐射源的首选^[1]。近年来, 紫外光源曝光的光刻、电铸和注塑(Ultraviolet-Lithographie, Galvanoformung, Abformung, UV-LIGA)技术和深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)等微细加工技术的进步促进了太赫兹微电真空行波管器件的研究和发展。

折叠波导行波管(FWG-TWT)在散热、功率、带宽等方面相对于其他同类器件存在很大优势, 可应用于 0.1~1.5 THz^[2-3]。为尽快推进太赫兹的应用, 美国、韩国、中国、欧洲等争先开展了太赫兹 FWG-TWT 的研究以及研制工作。在美国 DARPA HiFive 计划支持下, 2014 年美国海军试验室等单位联合成功研制出 0.218 THz 的折叠波导行波管; 2012~2014 年, 美国 NGES 公司连续研制成功了 0.214 THz, 0.65 THz, 0.85 THz 附近的多支管子^[3-5]。在国内, 中国工程物理研究院、电子科技大学、中国电子科技集团公司第 12 研究所、中国科学院电子学研究所等均开展了太赫兹微电真空折叠波导行波管放大器的研究工作, 并取得了一定的进展^[6-13]。结合实验模型, 本文将对 0.22 THz 电子光学系统(包括电子枪和周期永磁聚焦系统两部分)进行细致的仿真验证工作, 分析影响电子注流通率的关键因素, 研究提高电子注流通率的有效方法。

收稿日期: 2016-10-28; 修回日期: 2017-01-12

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术研究中心基金资助项目(MT2015-08-07)

1 电子枪的工作机制研究和仿真验证

皮尔斯电子枪在“O”型微波、毫米波器件中被广泛应用。太赫兹微电真空折叠波导行波管采用的电子枪为皮尔斯枪结构,电子枪的工作机制分为温度支配方式和空间电荷支配方式。电子枪的阴极采用热电子发射机制,原则上电子枪可以工作在温度支配方式,但实际上电子枪的输出电流受到 2 种工作方式共同制约。

采用三维粒子跟踪仿真软件对电子枪的 2 种工作方式数值模拟验证,得到软件的模拟精确度,然后对 0.22 THz 电子枪的实验模型进行仿真分析。

1) 电子枪的温度支配工作方式

阴极热电子发射采用 Richardson-Dushman 公式,阴极电子发射密度为:

$$J = A_0 T^2 e^{-eE_\phi/kT} \quad (1)$$

式中: E_ϕ 为逸出功; A_0 为发射常数; T 为温度; k 为玻尔兹曼常数; 上标 e 为电子电量。

采用热电子发射式(1),可计算得到阴极发射电流随温度的变化关系。在三维仿真软件中构建电子枪模型,阴极采用热阴极发射机制,电子枪为温度支配工作方式,监测电子枪的输出电流和阴极温度的关系。通过两者对比得出,理论计算结果和软件数值模拟结果吻合,验证了软件对电子枪温度支配工作方式的数值模拟精确度,误差小于 2.5%。如 $A_0 = 120.4 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$,逸出功 $E_\phi = 2.63 \text{ eV}$, $T = 1607 \text{ K}$ 时,由式(1)计算得 $I = 9 \text{ mA}$ 。由软件仿真得到电子枪电流为 8.79 mA,误差为 2.3%。

2) 电子枪的空间电荷支配工作方式

电子枪在空间电荷限制流工作方式下的一个重要参数就是导流系数 P ,它可表示为:

$$P = I / U^{3/2} \quad (2)$$

导流系数仅与几何尺寸有关,电子枪结构确定后,导流系数恒定不变,电压和电流满足查尔德-朗缪尔(Child-Langmuir)定律,即二分之三次方定律关系。通过对空间电荷支配方式时的电子枪模型进行仿真,观察电子枪在不同电压下的输出电流,即电子枪的最大容许输出电流。软件仿真结果表明,电压和电流满足二分之三次方定律关系,如表 1 所示。从表 1 可以看出,电子枪的导流系数恒定,不因电子注电压、电流等工作参数的变化而变化。

3) 电子枪的数值模拟验证

对 0.22 THz 电子枪实验模型进行仿真验证,

结果表明,电子枪的输出电流受到温度支配方式和空间电荷支配方式的共同制约。空间电荷支配方式时的电子枪输出电流是电子枪的饱和电流,即电子枪最大容许输出电流。实验中,电子枪结构确定并加工后,当电流未达到空间电荷支配电流时,可以通过提高阴极温度来提高阴极的发射电流,这相应提高电子枪的输出电流;但当阴极发射电流达到电子枪的最大容纳能力后,电子枪的输出电流达到饱和,不会随阴极温度的增加而增加。

在实际电子枪参数设计中,空间电荷支配工作方式下的最大容许电流是电子枪的输出极限,电子枪的输出电流一般都要小于或等于电子枪的最大容许电流。

2 电子光学系统的一体化模型仿真验证

在实际试验的器件装配过程中,电子枪和 PPM 的对接技术直接影响着电子注的整体流通率。在三维粒子跟踪软件中对电子光学系统(包括电子枪和 PPM)进行一体化建模、数值模拟以及结果分析,一体化模型如图 1 所示。一体化模型包括电子枪(包括阴极、套筒、聚焦极和阳极)和 PPM(包括磁环和极靴)。该三维软件可以研究粒子在三维静电场、静磁场中的自洽运行。在数值模拟过程中,物理模型边界条件、运行参数对仿真结果影响很大,需要合理设置。通过研究发现,阴极附近的场影响着阴极电子发射以及后续电子轨迹,因此结合实际,在仿真模型中加入了阴极套筒结构。

通过对 0.22 THz 折叠波导行波管的电子光学系统的一体化模型进行仿真,监测了电子光学系统的电场分布、磁场分布、电子注轨迹,具体结果如图 2~图 4 所示。图 2 为电场强度矢量分布图,阴极、套筒和聚焦极的电压为 0 V,阳极为 14.6 kV,电子枪区实现了电子加速场的施加。从图 2 可以看出,电场主要分布在电子枪区,PPM 区几乎不存在电场。图 3 为磁感应强度矢量分布图,通过磁环上的充磁,实现了 PPM 区聚焦磁场的施加。通过

表 1 不同束压时电子枪的输出电流及其导流系数

Table1 Gun's output current and its perveance when the voltages are changed

	U/kV			
	13.5	14.0	14.6	15.0
I/mA	9.82	10.37	11.04	11.50
P	6.26×10^{-9}	6.26×10^{-9}	6.26×10^{-9}	6.26×10^{-9}

磁环的相斥排列,实现了中心轴线上磁场的近正弦分布,从而约束近轴线的电子注,保证电子注稳定传输。从图3可以看出,磁场主要分布在 PPM 区,电子枪区几乎不存在磁场,在阳极孔内存在少量磁场泄露,这会对电子枪和 PPM 对接处的电子注传输造成一定影响。图4为电子注轨迹及能量分布示意图,电子注从阴极产生,经过电子枪区的加速电场加速,在 PPM 区电子注受到聚焦磁场的约束,实现了电子注的高通过率稳定传输,这是电子光学系统的研究目标。电子注的高通过率是器件高效束-波互动的前提和保证。

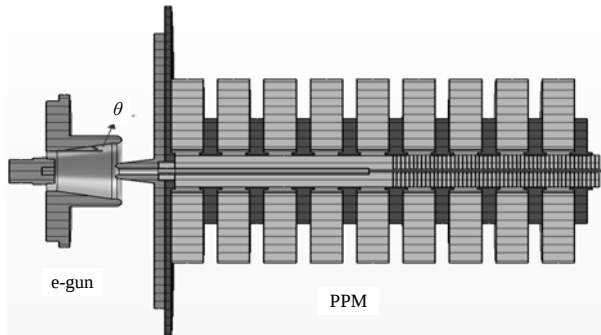


Fig.1 Model of the whole electronic optics system
图1 电子光学系统一体化模型

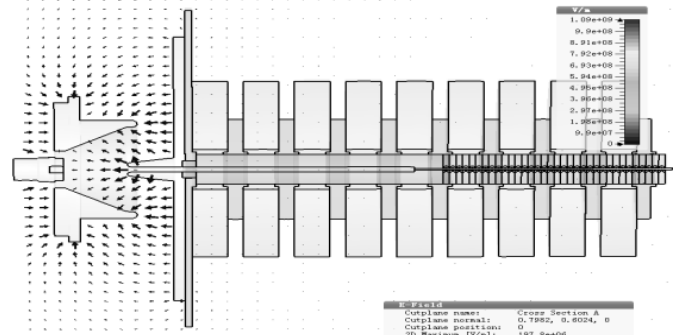


Fig.2 Electric field of the whole electronic optics system
图2 电子光学系统的电场分布

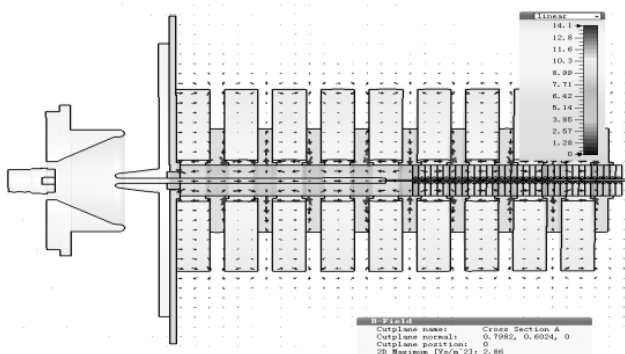


Fig.3 Magnetic field of the whole electronic optics system
图3 电子光学系统的磁场分布

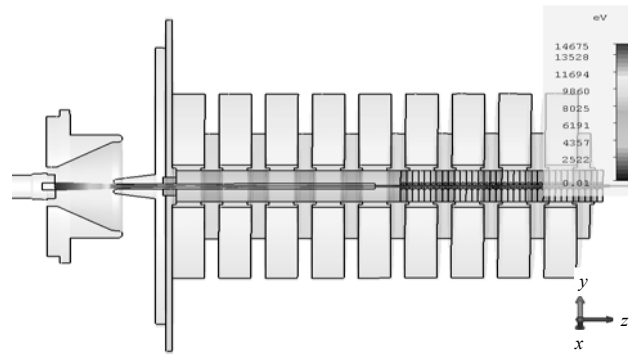


Fig.4 Electron beam flow in the whole electronic optics system
图4 电子光学系统的束流轨迹

通过对电子枪和 PPM 的一体化模型的仿真分析,可以更加直观和细致地研究整个器件中电子注的直流流通率,研究电场、磁场在整个器件的场分布,分析电子枪和 PPM 的对接技术对流通率的影响,研究影响电子注流通率的主要因素,寻求提高电子注流通率的方法。经验表明,通过调整磁环剩磁,微调电子枪和 PPM 过渡区以及流通管的磁场曲线分布,可有效提高电子注直流流通率。本文通过改变聚焦极的角度 θ (通过调整聚焦极开口的右端径长实现角度 θ 的变化,其他参数不变),调整电子注的束腰半径、位置,提高电子注在流通管中的直流流通率,角度 θ 对电子注流通率的影响如表2所示。由表2可看出,通过调整 θ ,提高了电子注流通率,最终电子光学系统的电子注流通率达到 95.2%。

表2 不同角度 θ 时的束腰位置、束斑大小、流通率等

Table2 Beam waist's position,size and beam's passing rate with different angle θ

	$\theta/(^\circ)$							
	11.3	20.0	25.8	30.0	35.7	40.7	45.0	46.3
focus position/mm	7.75	8.70	9.50	10.30	11.10	11.50	11.70	11.70
radius of focus spot/mm	0.015	0.015	0.010	0.010	0.006	0.006	0.006	0.006
output current/mA	0.5	1.4	2.3	3.4	6.1	8.0	8.6	8.4
passing rate/%	5.6	15.1	25.9	38.0	67.3	89.2	95.2	93.6

3 结论

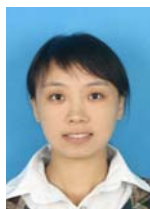
针对微电真空折叠波导行波管的电子枪结构,研究了电子枪的工作机制及其影响电子枪输出电流的因素。通过理论和数值模拟,分析并验证了电子枪空间电荷限制流与温度支配流2种工作方式。研究得出 0.22 THz 折叠

波导行波管的电子枪同时受到 2 种工作机制的制约。进行 0.22 THz 折叠波导行波管的电子光学系统模型的仿真验证工作,对电子光学系统进行一体化建模,验证确定模型的结构参数、工作参数和边界条件等;分析了电子光学系统中的电、磁场分布,电子注流通过率;最后通过调整结构参数和束流参数提高电子注流通过率。

参考文献:

- [1] BOOSKE J H, DOBBS R J, JOYE C D. Vacuum electronic high power terahertz sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1):54–75.
- [2] SRIVASTAVA A. Microfabricated terahertz vacuum electron devices: technology capabilities and performance overview[J]. European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2015, 2(8):54–64.
- [3] TUCEK J C, BASTEN M A, GALLAGHER D A, et al. Testing of a 0.850 THz vacuum electronic power amplifier[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Paris, France: [s.n.], 2013. DOI:10.1109/IVEC.2013.6571144.
- [4] KREISCHER K E, TUCEK J C, BASTEN M A, et al. 220 GHz power amplifier testing at Northrop Grumman[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Paris, France: [s.n.], 2013. DOI:10.1109/IVEC.2013.6570961.
- [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, USA: [s.n.], 2012:31–32.
- [6] 王亚军, 徐翱, 颜胜美, 等. 微加工工艺误差对 THz 折叠波导行波管性能影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(2):179–183. (WANG Yajun, XU Ao, YAN Shengmei, et al. Effect of microfabrication process on terahertz folded waveguide TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(2):179–183.)
- [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 QuanFeng, 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] GILMOUR A S. Principles of traveling wave tubes[M]. Boston, USA: Artech House, 1994.
- [9] 张芳, 董烨, 董志伟, 等. 微电真空折叠波导行波管放大器的电子枪设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(3):320–324. (ZHANG Fang, DONG Ye, DONG Zhiwei, et al. Design of electron gun for vacuum microelectronic FWG-TWT amplifier[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3):320–324.)
- [10] 张芳, 董志伟. 0.22 THz 微电真空折叠波导行波管聚焦磁场的理论分析与仿真研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(4):522–526. (ZHANG Fang, DONG Zhiwei. Simulation of FWG-TWT's focused magnetic system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(4):522–526.)
- [11] 王亚军, 颜胜美, 陈樟. 0.22 THz 宽带折叠波导慢波结构的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1):14–18. (WANG Yajun, YAN Shengmei, CHEN Zhang. Design of slow-wave structure for 0.22 THz broadband folded waveguide[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(1):14–18.)
- [12] 徐翱, 周泉丰, 阎磊, 等. 0.34 THz 折叠波导行波管设计及流通管试验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(2):153–157. (XU Ao, ZHOU Quanfeng, 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.)
- [13] 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]. 太赫兹科学与电子信息学报, 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]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3):300–302.)

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的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, 主要研究方向为高功率微波技术.

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

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

束小建(1963–), 男, 江苏省泗阳县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光技术等.