

文章编号: 2095-4980(2015)06-0864-06

0.345 THz 微电真空 FWG-TWT 的电子光学系统

张芳^{1,2a}, 董志伟^{1,2a}, 周泉丰^{2b}, 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 a.微系统与太赫兹研究中心;
b.应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 对于太赫兹微电真空折叠波导行波管(FWG-TWT)放大器, 高通率是试验测试中首先需要达到的技术指标, 是器件连续工作时高效束-波互作用的前提。电子光学系统包括电子枪、周期永磁聚焦系统(PPM)和收集极。本文通过对电子枪的高品质束流的产生、PPM对束流的聚焦两个方面研究束流的直流流通率。首先依据Vaughan迭代综合法初步选定电子枪的基本结构尺寸, 然后通过粒子跟踪程序及PIC程序对电子枪的结构参数进行仿真优化, 初步实现了0.345 THz FWG-TWT放大器所需的束流品质; 进行了电子光学系统的电子枪和PPM的一体化数值模拟, 研究了电子的直流流通率, 最终流通率模拟结果达到100%。

关键词: 太赫兹; 电子光学系统; 折叠波导行波管放大器

中图分类号: TN102

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0864

Optics system of 0.345 THz micro-electronic vacuum FWG-TWT

ZHANG Fang^{1,2a}, DONG Zhiwei^{1,2a}, ZHOU Quanfeng^{2b}, SHU Xiaojian¹

(1.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China; 2a.Microsystem and Terahertz Research Center;
2b.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: High passing rate of the beam is one of the most essential technical targets for terahertz micro-electric vacuum Folded Waveguide Traveling Wave Tube(FWG-TWT) amplifiers, which can guarantee highly efficient continuous beam-wave interaction. The optical system is composed of electron gun, Periodic Permanent Magnet(PPM) and collector. The paper will focus on the gun which is used to produce the electron beam and the PPM which is used to focus the beam, to study the direct current passing rate of beams. Firstly, the sizes of the gun's structure are initially determined by using Vaughan iterative method, and then particle tracking code and Particle In Cell(PIC) code are applied to optimize these structure parameters. The beam of high quality required for 0.345 THz FWG-TWT amplifiers is realized. Numerical simulations of the whole integrated optical system are carried out to study the direct current passing rate of beam, and it reaches 100% ultimately.

Key words: terahertz radiation; optics system; Folded Waveguide Traveling Wave Tube amplifier

目前太赫兹雷达、通信、探测、成像等研究领域的重大应用潜力提出了研究大功率、紧凑型、低成本、宽带太赫兹源的迫切需求, 相关研究主要集中在几个太赫兹大气窗口频率, 如 0.14 THz, 0.22 THz, 0.34 THz, 0.67 THz 等。微电真空折叠波导行波管(FWG-TWT)以其突出的特点引起了广泛关注和研究, 它作为太赫兹源中的放大器有广阔的应用前景。可是由于现阶段微加工能力和测量手段有限, 太赫兹 FWG-TWT 放大器的研制遇到很大的挑战。美国、俄罗斯、韩国以及我国中国工程物理研究院等单位都在进行该器件的研制工作, 研究水平尚处于起步阶段^[1-2]。

太赫兹 FWG-TWT 放大器的电子光学系统包括电子枪、周期永磁聚焦系统(PPM)和收集极, 其电子束的流通率决定了行波管的工作性能。对于太赫兹波段的微电真空 FWG-TWT, 它工作频率高, 器件尺寸小, 束波作用区所需电子束的电流密度远大于阴极能够提供的发射电流密度, 因此需要相当大的阴极面发射电子, 然后采用电或磁的方式将其压缩形成所需的电子束流, 同时对电子枪输出的束流横向发射度质量要求很高。在束-波作用

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2015-01-25

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目; 国家高技术发展计划资助项目

区内该高密度电子束的传输过程中, PPM 的磁场聚焦性能影响着束流的稳定传输效果。随着太赫兹工作频率的提高, 如 0.14 THz, 0.22 THz 直至 0.345 THz, 器件尺寸缩小, 束流通道也相应减小至亚毫米甚至更低量级(0.345 THz 电子束漂移管半径为 0.06 mm, 束半径为 0.03 mm, 束流密度 259 A/cm²)。在现有太赫兹器件的相关研制条件下, 为了得到慢波结构中束波相互作用所需的小尺寸、高束流密度、性能稳定的电子束, 电子枪和 PPM 的理论优化设计不可或缺。本文通过理论分析和数值模拟手段研究和设计了电子枪的结构参数, 有效地控制了电子束的空间电荷力和横向发射度, 使输出电子束的尺寸和束流密度达到要求; 进行了 PPM 的相关研究, 通过电子枪和 PPM 的一体化模型的数值模拟, 研究电子束的整个传输过程, 实现了电子束的高直流通率。

1 电子枪理论模型

皮尔斯(Pierce)电子枪在“O”型微波、毫米波器件中被广泛应用。本文采用皮尔斯枪结构来设计 0.345 THz 微型 FWG-TWT 放大器所需的电子枪, 结构如图 1 所示^[3], 包括阴极、聚焦极和阳极。对于工作频率为 0.345 THz 的微型 FWG-TWT, 为了有效地实现束波能量转换, 电子枪输出的电子束设计指标为: 束流为 7 mA, 束压为 19 kV, 束半径为 0.03 mm, 漂移管孔径为束腰的 2 倍, 面积压缩比为 30, 阴极电流发射密度为 8.7 A/cm²。

在求解场域中各场量满足的物理方程有^[3]:

1) 麦克斯韦方程:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = -\rho \\ \nabla \times \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \end{cases} \quad (1)$$

2) 电磁场中电子运动方程:

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

3) 电流连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

式中: \mathbf{D} 为电位移; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{J} 为电流面密度; ρ 为电荷体密度; \mathbf{v} 为电荷速度; m 为电荷质量; e 为电荷电量。

阴极采用热阴极发射模型, 阴极电流密度计算公式为:

$$J_c = A_0 T^2 e^{-eE_\phi/kT} \quad (4)$$

式中: E_ϕ 为逸出功; A_0 为发射常数; T 为温度; k 为波尔兹曼常数。通过式(4)可以看出: 阴极发射电流密度和温度正相关, 和电子的逸出功反相关。但是实际发出的电流受到该电子枪空间电荷流的限制, 如图 2 所示, 曲线的上升区说明发射电流随温度的升高而增大, 但是曲线存在饱和区, 由于阴极空间电荷效应的影响, 发射电流不再增加。

热阴极电子发射的初始速度为:

$$v_0 = \sqrt{3k \frac{T}{m}} \quad (5)$$

2 电子枪设计

本文采用 Vaughan 迭代综合法进行该皮尔斯电子枪的初始参数设计, 该方法既快又准, 在 1981 年由 Vaughan 提出后被广泛应用^[3-4]。通过 Matlab 编程实现了 Vaughan 迭代综合法的设计流程, 初始结构参数值可由阳极电压 U_a 、电流 I_a 、束腰半径 r_w 及阴极发射电流密度 J_c 这 4 个参数唯一确定, 其中需要设计的关键结构参数包括: 阴极半锥角 θ 、阴极截面半径 r_c 、阴极曲率半径 R_c 、阳

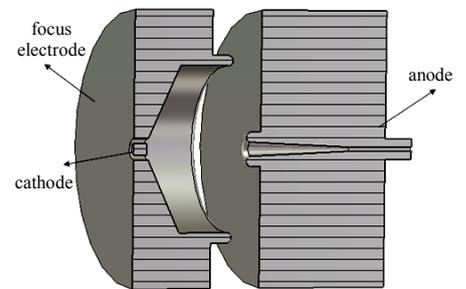


Fig.1 Structure of Pierce gun
图 1 皮尔斯枪结构示意图

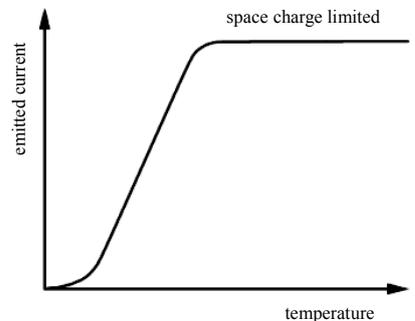


Fig.2 Cathode's emitted current vs. temperature
图 2 阴极发射电流随温度的变化示意图

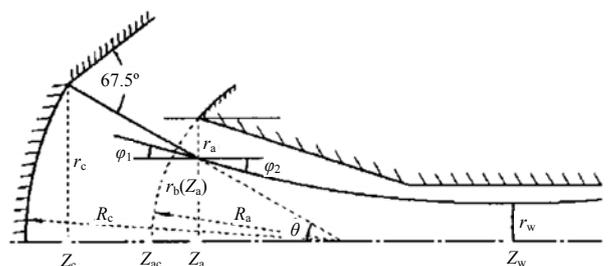


Fig.3 Structure parameters of Pierce gun
图 3 皮尔斯枪主要结构参数示意图

极半径 r_a 、阳极曲率半径 R_a 、阳极头位置 Z_a 、射程 Z_w 等, 如图 3 所示^[3-7]。

粒子跟踪程序以及 PIC 程序软件都可以进行电子枪的数值模拟计算, 可研究电子束流在电场或磁场中的自洽运动过程, 其中 PIC 程序消耗较多的机器内存和仿真时间, 但 2 程序可以进行相互验证。在软件中设置式(4)计算的热阴极电子发射参数, 在阴极、聚焦极以及阳极上施加电压, 并选择数值边界条件进行数值模拟。

电子枪中使电子束发散的原因, 除了空间电荷的排斥力外, 还有电子的热初速度, 它将引起电子轨迹的偏离和造成电子注截面中电流密度分布的不均匀, 可以通过设置阴极电子的发射角及能散度来考察电子束的能散度、横向发射度对电子束发散的影响。

对于 Vaughan 迭代综合法得到的电子枪结构参数, 如果通过模拟仿真, 得到输出端的束流质量达到各项指标, 这是最理想的情况。如果仿真结果不能满足要求, 例如束流小了, 或束半径大了, 则需要在理论依据的基础上, 根据束流、束半径与各结构参数的关系, 调整优化各参数(如调整聚焦极形状、阴阳极间距等可微调聚焦斑的半径大小及位置远近), 可参考文献[8]。

对电子枪初始结构参数进行建模及优化, 得到电子枪的结构尺寸如图 4 所示。通过仿真得到电位分布, 如图 5 所示, 枪区的电位分布与球形二极管基本保持一致, 阳孔区像一个很薄的透镜, 漂移区为等位空间。电力线的法线方向为电场强度方向, 电场强度矢量分布图如图 6 所示, 与电子束流加速的反方向一致。电场强度分量 E_y (E_x 和 E_y 相同) 和 E_z 的幅度分布如图 7 所示, 可以看出场强在几何曲率较大的位置数值较高。粒子的运动轨迹如图 8 所示, 可以看出电子从阴极发射, 通过电场加速后进入阳极孔。从图 9 可以看出, 电子枪产生电流为 7 mA。

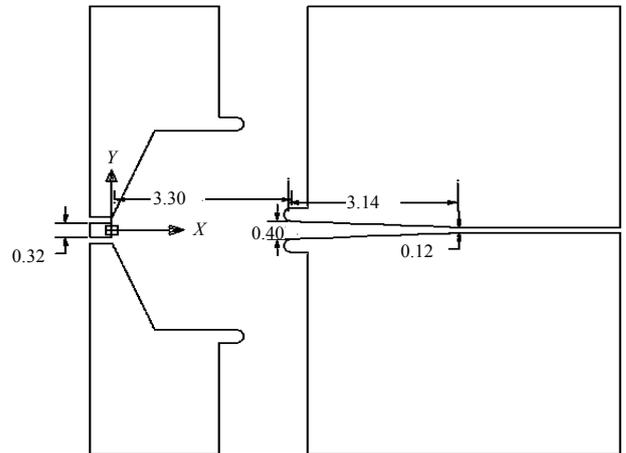


Fig.4 Sizes of designed Gun structure
图 4 设计的电子枪尺寸(单位:mm)

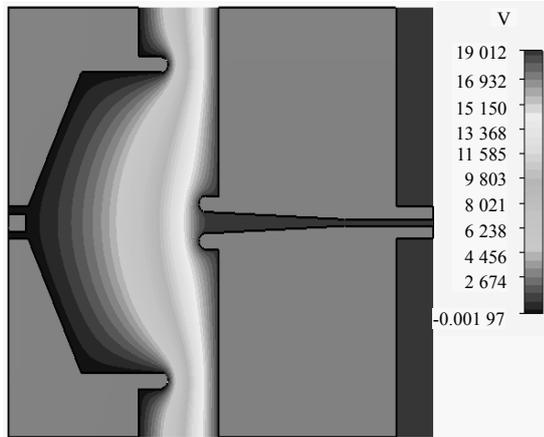


Fig.5 Potential distribution profile
图 5 电位分布纵剖面图

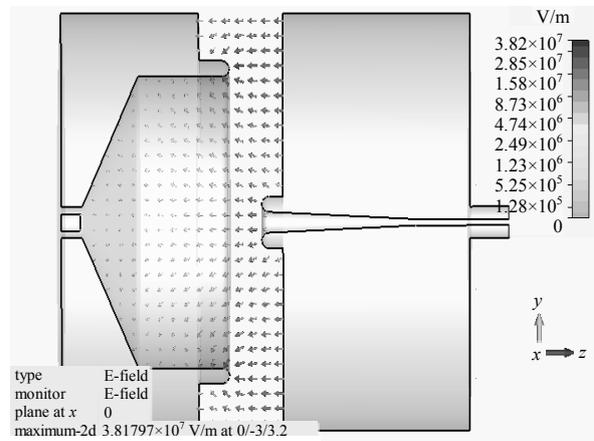


Fig.6 Electric field intensity profile
图 6 电场强度矢量分布纵剖面图

3 电子枪和 PPM 的一体化模型

电子束的流通率对器件的工作性能至关重要, 高流通率是高效束波互作用的前提与保证, 是试验测试首先需要的指标。PPM 磁场已经成为电子注聚焦的一种有效方法, 具有体积小、重量轻、不消耗电源功率、杂散磁场小及使用方便等优点。PPM 聚焦磁场的主要特征是, 在纵向中心轴线上产生的 z 方向磁场为正弦分布, 对电子束流产生了聚焦力, 主要用于克服束流空间电荷力以及电子横向不稳定性等原因引起的束流横向发散力, 从而保证束流的稳定传输。本文采用的 PPM 初步研究理论可参考文献^[9-13], 该模型采用磁场幅值 0.45 T, 周期长度为 7.2 mm。折叠波导行波管的整个电子光学系统包括电子枪、PPM 聚焦系统和收集极。在实际试验装配过程中, 电子枪和 PPM 对接时, 准直度要求非常高, 通常需要不断尝试补贴磁片来进行 PPM 磁场的校正, 力求实现较高的束流流通率^[14-17]。在软件中构建电子枪和 PPM 结构的全三维一体化模型, 研究电子束的直流流通率, 分

析影响通过率的主要因素。电子枪和 PPM 的一体化模型的数值模拟，同时包含了电子在电子枪电场的加速运动和电子在 PPM 磁场中的波动传输过程，考虑了电子束流自身的空间电荷力，模拟了电子同时在电场、磁场中的自洽运动。

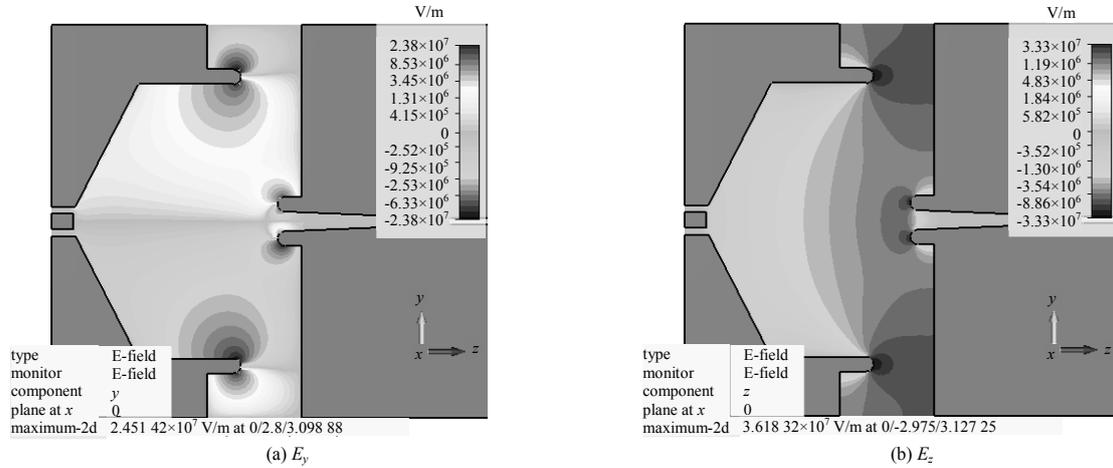


Fig.7 Amplitude distribution of the components E_y and E_z

图 7 电场强度分量 E_y 和 E_z 的幅度分布

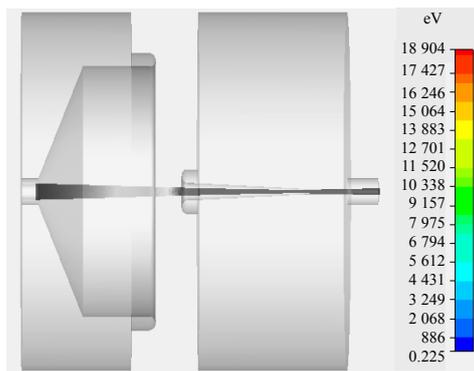


Fig.8 Electron beam flow

图 8 电子束轨迹图

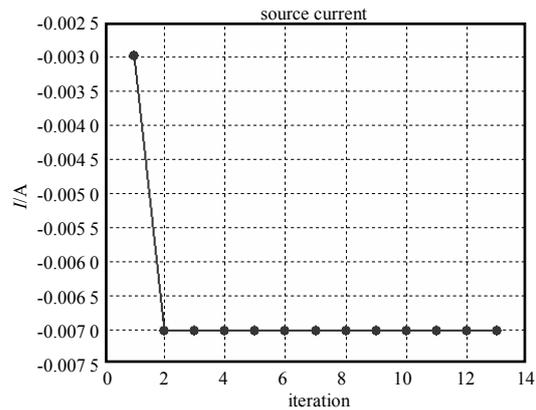


Fig.9 Electron current emitted

图 9 发射电流

如图 10 所示，该一体化模型包括了电子枪、PPM 以及折叠波导慢波结构，其中慢波结构是在研究高频通过率(考虑束-波相互作用过程)时使用，现在暂不考虑。如图 10 所示，电子枪采用 PEC 材料，用于施加电压；PPM 结构包括了磁环和极靴，磁环用于充磁，极靴磁导率较高，用于导磁；慢波结构采用铜材料。由于该三维一体化模型涉及到不同的子器件(如电子枪、PPM 以及慢波结构等)和不同的物理过程(如电子发射、电子在电场中的加速、电子在磁场中的聚焦以及将要研究的束-波相互作用过程等)，则在数值模拟中需要的剖分网格数目庞大，占用内存很大，仿真时间较长。

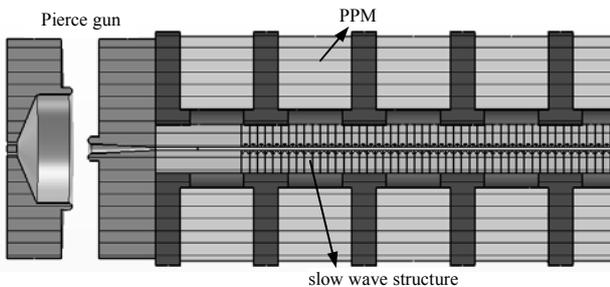


Fig.10 Cross-section of the united model

图 10 一体化模型的横截面图

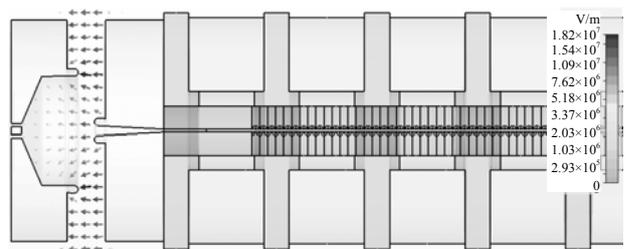


Fig.11 Electric field of the united model

图 11 一体化模型的电场分布

一体化模型的电场分布如图 11 所示，该静电场主要存在于电子枪区，电子流通管中为等位区。静磁场的分布如图 12 所示，由于第一片极靴的高导磁作用，电子枪区磁场几乎为零(实际上，阳极和极靴的材料属性相同，

都为纯铁,但是在数值模拟中把阳极设置为 PEC,主要是用于施加电压。由于纯铁的高导磁性,使得磁力线几乎没有进入电子枪区)。在相互作用区内的中心轴线上,纵向磁场强度分量呈正弦分布。对于优化后的该一体化模型,电子束流轨迹如图 13、图 14、图 15 所示,可以看出电子的流通率达到 100%。

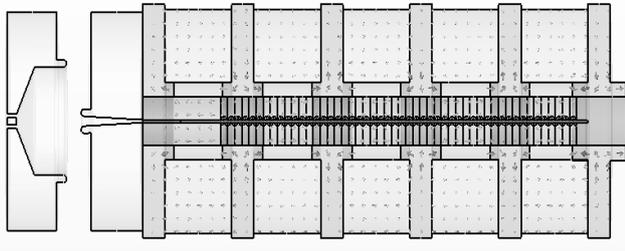


Fig. 12 Magnetic field of the united model
图 12 一体化模型的磁场分布

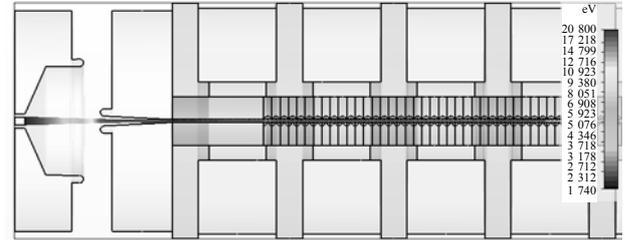


Fig. 13 Electron beam flow of the united model
图 13 一体化模型的电子束运动轨迹

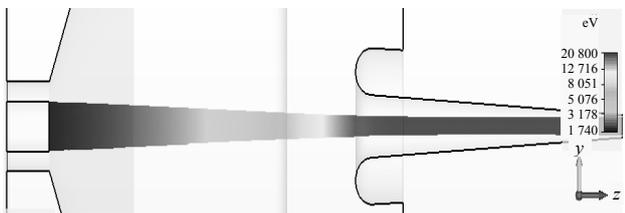


Fig. 14 Electron beam flow in the gun region of the united model
图 14 一体化模型的电子枪区电子束分布

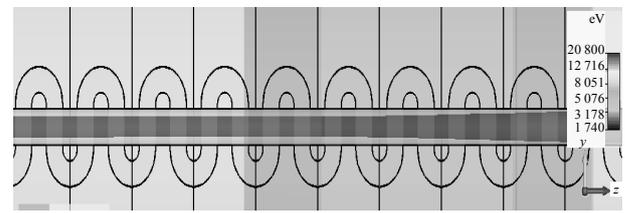


Fig. 15 Electron beam flow in beam-wave interaction region of the united model
图 15 一体化模型的相互作用区电子束分布

4 结论

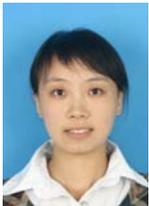
本文通过理论和数值模拟方法研究了 0.345 THz 微电真空折叠波导行波管的电子光学系统,包括电子枪和 PPM。首先通过 Vaughan 迭代综合法选定电子枪的初始结构参数,然后利用仿真软件进行了模拟优化。通过电子枪和 PPM 聚焦磁场的三维一体化数值模拟,研究了电子束流的直流导通率,通过选取合适的磁场分布,有效实现电子束的聚焦及其稳定传输。通过该项工作的实施,具备了该类电子枪以及一体化模型的理论设计和仿真优化能力,并与实验配合,正在进行相关模型的验证并取得了一定的结果。

参考文献:

- [1] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, et al. Vacuum electronic high power terahertz sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1):54-75.
- [2] 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, CA, USA: IEEE, 2010:505-506.
- [3] Gilmour A S. Principles of Traveling Wave Tubes[M]. Boston: Artech House, 1994.
- [4] 杨赤如, 贾宝富, 朱兆君. 对皮尔斯电子枪综合法的改进[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9):1544-1548. (YANG Chiru, JIA Baofu, ZHU Zhaojun. Improvement in the synthesis method of the Pierce electron gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9):1544-1548.)
- [5] 廖燕, 贾宝富, 罗正祥. 轴对称收敛型电子枪设计方法再讨论[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3):427-430. (LIAO Yan, JIA Baofu, LUO Zhengxiang. Re-discussion design methods for Pierce guns[J]. High Power laser and Particle Beams, 2005, 17(3):427-430.)
- [6] 廖平, 杨中海, 雷文强, 等. 微波管电子枪三维粒子模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(3):353-355. (LIAO Ping, YANG Zhonghai, LEI Wenqiang, et al. Study on 3-D MAFIA PIC simulation for microwave tube electron gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(3):353-355.)
- [7] Herrmann G. Optical theory of thermal velocity effects in cylindrical electron beams[J]. Journal of Applied Physics, 1958, 29(2):127-136.
- [8] 张芳, 董焯, 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.)

- [9] 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.)
- [10] 王兵. 行波管电子枪的设计与模拟[D]. 成都:电子科技大学, 2006. (WANG Bing. The design and simulation of TWT's gun[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [11] Santra M,Kumar L. An improved analysis of PPM focusing structures including the effect of magnetic saturation in the iron pole pieces[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009,56(5):974-979.
- [12] Juravleva V D,Rogovin V I,Semenov S O. Investigation of magnetic field transverse component influence on beam transmission in TWT EOS[C]// 2010 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov,Russia:IEEE, 2010:66-72.
- [13] 张芳,董志伟,董焯,等. 束流发射度对太赫兹折叠波导行波管性能的影响分析[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(5):1-5. (ZHANG Fang,DONG Zhiwei,DONG Ye,et al. Research on the important role of emittance to FWG-TWT performance[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(5):1-5.)
- [14] 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.)
- [15] 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.)
- [16] 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 Le,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.)
- [17] 陈樟,王亚军. 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构设计与加工[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.

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.

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.