

文章编号: 1672-2892(2011)03-0320-05

## 微电真空折叠波导行波管放大器的电子枪设计

张芳, 董焱, 董志伟, 孙会芳

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 研制工作于太赫兹波段的微电真空折叠波导行波管(FWG-TWT)放大器, 需要设计束流集中且发射度小、结构紧凑的热阴极电子枪。本文首先依据典型皮尔斯电子枪的设计理论, 通过编程计算初步选定了热阴极电子枪的基本结构参数, 然后利用模拟工具对电子枪的结构参数模型进行了初步的仿真优化。针对工作频率为 0.22 THz 的微型折叠波导行波管, 设计电子枪输出: 束流约为 20 mA, 束压为 18.4 kV, 束半径为 0.01 cm, 发射度为 1.0 mm-mrad 的系统要求。

**关键词:** 太赫兹; 电子枪; 热阴极; 折叠波导行波管

**中图分类号:** TN102

**文献标识码:** A

## Design of electron gun for vacuum microelectronic FWG-TWT amplifier

ZHANG Fang, DONG Ye, DONG Zhi-wei, SUN Hui-fang

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** As vacuum microelectronic devices for terahertz radiation, the design and development of Folded Waveguide Traveling-Wave Tube(FWG-TWT) amplifiers requires such electron guns that have concentrated beam flow, small emittance, compact structure, thermionic emission cathode. This paper discusses the theory of typical Pierce gun, and then determines the design parameters of gun structure by following Vaughan programming steps, lastly the structure is optimized by using simulation software. According to 0.22 THz FWG-TWT, beam output requirements of electron gun should be achieved as follows: beam-current is about 20 mA, beam-voltage 18.4 kV, minimum beam radius 0.01 cm, and particle emittance in the magnitude of mm-mrad.

**Key words:** terahertz radiation; electron gun; thermionic emission cathode; FWG-TWT

太赫兹波段正好处于电磁波技术发展相对成熟的微波与红外线光学之间, 在研究应用上是一个相对落后的“空白”。太赫兹辐射应用潜力巨大, 但其产生、传输以及探测的能力都亟待提高。对于利用自由电子的太赫兹(Terahertz, THz)辐射源, 具体到 THz 真空电子学器件, 具有结构紧凑, 小型, 使用方便, 宽带、高功率、高效率的优点<sup>[1-5]</sup>。工作于太赫兹波段的微电真空折叠波导行波管放大器, 它由二极管(电子枪)区、相互作用区、收集极区等组成, 电子枪的设计在行波管的整管设计中占有重要地位, 电子枪产生的电子注的质量从根本上决定了行波管的性能, 必须合理地确定电子枪的结构参数, 使其输出的束流质量能够有效地实现束波能量的转换。对于太赫兹波段的微电真空折叠波导行波管放大器的设计, 根据高频率、小尺寸的要求, 需要设计束流集中且发射度小、结构紧凑的热阴极电子枪。针对具体试验情况, 对于工作频率为 0.22 THz 的微型折叠波导行波管, 预设的电子枪的设计指标为: 输出电子束流约为 20 mA, 束压为 18.4 kV, 束半径为 0.01 cm, 发射度为 mm-mrad 量级。

### 1 电子枪区域的数学物理描述

2010年, Rajendra Kumar Sharma 等人在设计 100 GHz 折叠波导行波管<sup>[6]</sup>时, 电子枪采用皮尔斯枪结构。行波管电子枪中用得最多的是轴对称收敛型电子枪, 皮尔斯枪是其中典型的一种, 结构如图 1 所示<sup>[1]</sup>。本文也依据皮尔斯枪的结构来设计 0.22 THz 微型折叠波导行波管所需的电子枪。整个电子枪可分为 3 个部分: 第 1 部分为枪区, 指阴极与阳极之间的区域, 此区域中的电子轨迹、电位分布与球形二极管基本保持一致; 第 2 部分是阳孔

收稿日期: 2011-03-13; 修回日期: 2011-04-19

基金项目: 中国工程物理研究院预先研究资助项目(9090502-2)

区,其位置位于阳极孔附近,阳孔的作用是为了让电子注通过,可以把阳孔视为一个很薄的透镜;第 3 部分是漂移区,是阳极孔后的等位空间<sup>[2-4]</sup>。

在求解场域中,加静电场和静磁场情况下应满足的方程有<sup>[5]</sup>:

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:

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

在已知磁场分布的条件下,式(1)~式(3)经整理得:

$$\begin{cases} \nabla^2 U = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中各物理量相互制约,若想求出电位  $U$ ,就需先知道电荷密度  $\rho$ ,而  $\rho$  和电子的运动状态有关,电场强度  $\mathbf{E}$  或电位  $U$  又决定了电子的运动状态。

对于轴对称收敛型电子枪,如皮尔斯电子枪,其基本设计思想是在球形电子流中,切出一部分构成电子注。对于皮尔斯电子枪(依据球形二极管),通过求解泊松方程即可得到阳极电流与电压之间的近似关系,即著名的 3/2 次方定律如下:

$$I_a = 14.67 \times 10^{-6} \frac{(1 - \cos \theta)}{(-\alpha_a)^2} U_a^{3/2} \quad (5)$$

由式(5)可得,阳极电流  $I_a$  与电压  $U_a$  的 3/2 次方成正比,与角度  $\theta$  正相关。参数  $(-\alpha_a)$  与阴阳极之间的距离  $d$  正相关,则阳极电流  $I_a$  与阴阳极之间的距离  $d$  反相关。

阴极采用热阴极发射模型,金属的热电子发射公式:

$$J = A_0 T^2 e^{-eE_\phi/kT} \quad (6)$$

式中:  $E_\phi$  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(6)可以看出:阴极发射电流密度和温度正相关,和电子的逸出功函数反相关。

## 2 电子枪结构的设计方法

皮尔斯电子枪的初始结构参数值可由阳极电压  $U_a$ 、电流  $I_a$ 、注腰半径  $r_w$  及阴极发射电流密度  $J_c$  这 4 个参数唯一确定<sup>[1-4]</sup>。要设计的几个关键结构参数有:阴极半锥角  $\theta$ 、阴极截面半径  $r_c$ 、阴极曲率半径  $R_c$ 、阳极半径  $r_a$ 、阳极曲率半径  $R_a$ 、阳极头位置  $Z_a$ 、射程  $Z_w$  等,如图 2 所示<sup>[1-4]</sup>。

电子枪的设计方法可以总结为 2 步:1) 根据束波相互作用对粒子束的要求,先采用皮尔斯电子枪综合设计方法,初步选定电子枪基本结构参数;2) 由数值软件进一步优化电子枪结构,使得电子枪输出端的电子束质量达到要求。

采用 Vaughan 迭代综合法设计电子枪结构参数初始值,此方法快而准,不依赖于设计者的经验,国内外的一些研究人员对于此综合法进行了多次验证以及修正。由于皮尔斯电子枪的初始结构参数值可由阳极电压、电流、注腰半径及阴极电流发射密度这 4 个参数唯一确定,可由此 4 个参数计算出阴极截面半径、阴极曲率半径、阳极半径等各参数,具体 Vaughan 迭代综合法的设计流程如图 3 所示<sup>[1-5]</sup>,此算法通过 Matlab 语言编程实现。

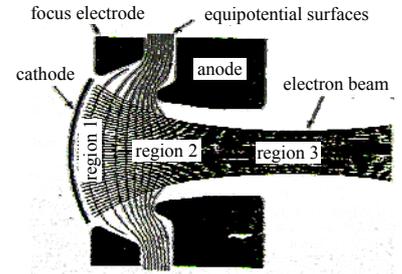


Fig.1 Structure of Pierce gun  
图 1 皮尔斯枪结构示意图

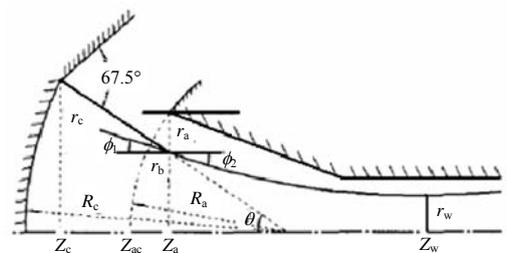


Fig.2 Structure parameters of Pierce gun  
图 2 皮尔斯枪主要结构参数示意图

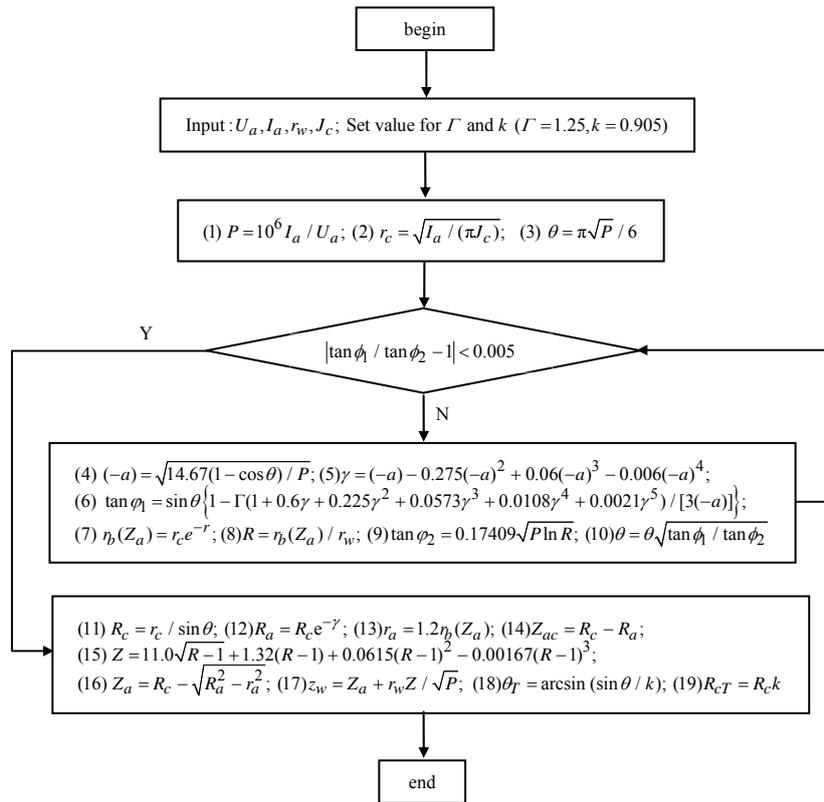


Fig.3 Calculation steps of Vaughan iteration method  
图3 Vaughan 迭代综合法的计算流程图

### 3 设计结果分析

电子枪的设计目标是：输出端束流质量满足束流约为 20 mA，束压为 18.4 kV，束半径为 0.01 cm，发射度在 mm·mrad 量级的系统要求。设计步骤：

1) 首先采用 Vaughan 迭代综合法求解电子枪的初始结构参数。输入 4 个参数：束流为  $I_a = 20 \text{ mA}$ ，束压为  $U_a = 18.4 \text{ kV}$ ，束半径为  $r_w = 0.01 \text{ cm}$ ，阴极发射电流面密度为  $J_c = 2 \text{ A/cm}^2$ 。输出参数：阴极截面半径  $r_c = 0.5642 \text{ mm}$ ，阴极曲率半径  $R_c = 13.3028 \text{ mm}$ ，阳极曲率半径  $R_a = 6.1191 \text{ mm}$ ，阳极半径  $r_a = 0.2818 \text{ mm}$ ，阳极头位置  $Z_a = 8.5867 \text{ mm}$ ，射程  $Z_m = 24.9662 \text{ mm}$ ，阳极半锥角  $\varphi = 0.8321^\circ$ ，阴极半锥角  $\theta = 2.4307^\circ$ 。

2) 对步骤 1)中得到的电子枪初始结构参数在仿真软件中建模，模型示意图如图 4 所示。对电子枪结构模型加入激励和初始条件，实行软件仿真。输入条件有：阳极电压加 18.4 kV，阴极和聚焦极加零电位；阴极采用热阴极发射模型，使用钨钨材料的相关参数，阴极电流发射密度为  $2 \text{ A/cm}^2$ ，电子逸出功函数为 2.63 eV，工作温度为 2 000 K；电子枪的阴极、阳极和聚焦极的材料都采用完纯导体。

通过仿真得到电位示意图，如图 5 所示，可以明显看出枪区、阳孔区、漂移区内的电力线分布。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，与电子加速的方向一致，粒子的运动轨迹如图 6 所示。

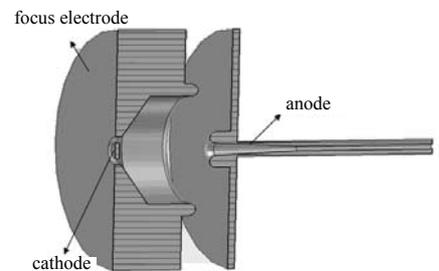


Fig.4 Gun structure in simulation  
图4 仿真中的电子枪结构示意图

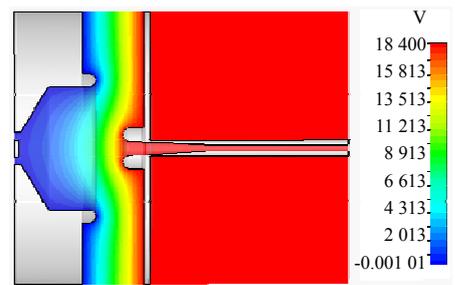


Fig.5 Equipotential profiles  
图5 电位分布纵剖面图

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,输出端束流质量一次性达到各项指标,这是最理想的情况。如果仿真结果不能满足技术要求,例如束流小了,或束半径大了,则需要理论依据的基础上,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)。

仿真中分别尝试了聚焦极的出口半径变化时,束半径和束流大小的变化情况:当聚焦极的出口半径变大时,电流增大,束半径增大;反之,调小聚焦极出口半径时,电流减小,束半径减小。

另外尝试了调节阴阳极之间的距离时,束半径和束流大小的变化情况:加大阴阳极间距可以使束流变细,束半径减小,但电流也会减小;反之,束半径增加,电流增加。可以结合调节聚焦极出口处的半径和阴阳极间距 2 种方法,优化结构参数,使输出束流质量达到技术要求。

通过调整各参数优化模型,最后选定了 1 组比较好的结构参数,通过仿真得到的电子束轨迹如图 7 所示,在电子束流最细时的束半径截面图如图 8 所示,输出束流为 23 mA,束压为 18.3 kV,束半径为 0.1 mm,发射度为 0.5 mm-mrad。从图 7 可以看出,电子束进入阳极孔后通过一定的距离后发散,此时在电子束的发散区域,为了克服电子之间的斥力和阳极电压对电子的吸引力,加入磁场,使得电子束不得发散,保持一定的半径范围传输。仿真中使用的磁场由螺线管线圈产生,加入磁场后的电子枪切面结构如图 9 所示,磁力线分布如图 10 所示。加入磁场后,仿真所得的孔径内电子束传输轨迹如图 11 所示。磁场的加入使得粒子束的层流性得到改善,如图 12 所示,相对于图 8 中的粒子束截面图,图 12 的粒子分布更均匀。

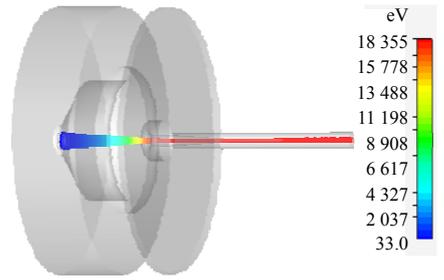


Fig.6 Electron flow  
图 6 粒子束轨迹示意图

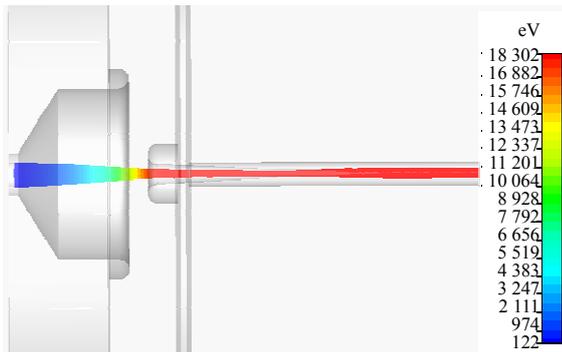


Fig.7 Electron flow  
图 7 电子束轨迹图

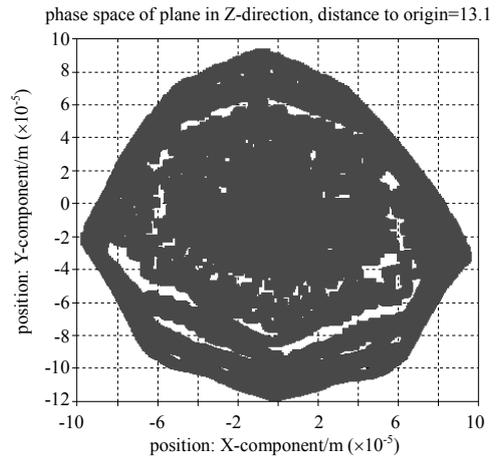


Fig.8 Minimum beam radius  
图 8 电子束半径图

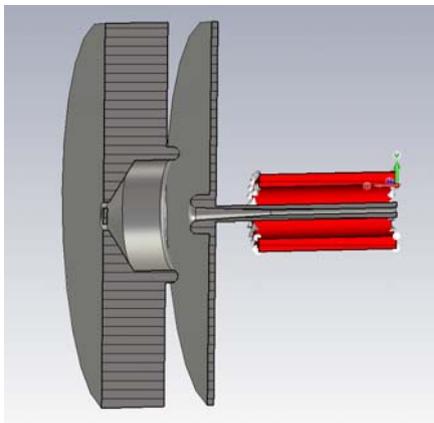


Fig.9 Pierce gun with an solenoid for launching magnetic field  
图 9 加入螺线管线圈型磁场后的电子枪结构图

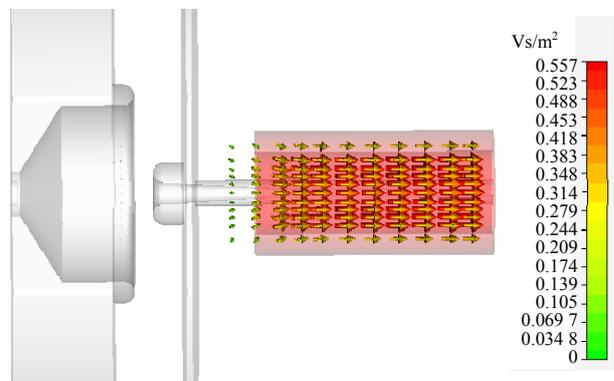


Fig.10 Magnetic field  
图 10 磁力线图

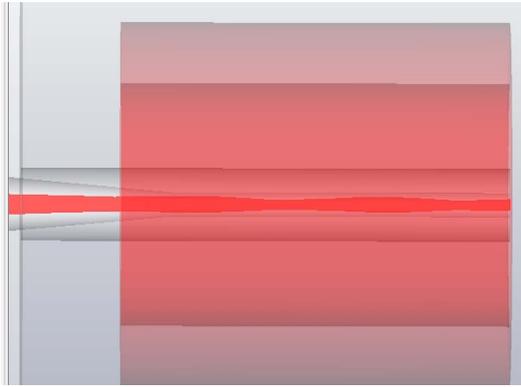


Fig.11 Confined electron flow in magnetic field  
图 11 加入磁场后的粒子束轨迹图

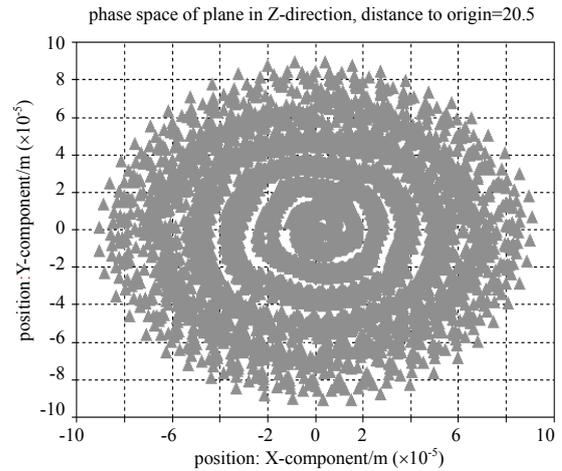


Fig.12 Minimum beam radius  
图 12 加入磁场后粒子的束半径图

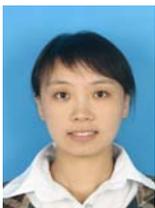
#### 4 结论

本文利用 Vaughan 迭代综合法,首先快速选定电子枪的初始结构参数;然后利用仿真模拟软件,对由 Vaughan 迭代综合法得到的电子枪结构参数建模、仿真,不断调整各参数来优化模型,使得输出端电子束质量满足要求。在电子枪的结构参数设计完毕后,加入磁场,使得电子束很好地传输,现在所尝试的磁场是由螺线管线圈产生,磁场的加入较好地改善了束流的质量。

#### 参考文献:

- [1] Gilmour A S. Principles of Traveling Wave Tubes[M]. Boston:Artech house, 1994.
- [2] 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 & Particle Beams, 2006,18(9):1544-1548.)
- [3] 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 & Particle Beams, 2005, 17(3):427-430.)
- [4] 廖平,杨中海,雷文强. 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. Study on 3-D MAFIA PIC simulation for microwave tube electron gun[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004,16(3):353-355.)
- [5] 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. Design and simulation of traveling wave tube electron gun[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [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,CA:[s.n.], 2010.

#### 作者简介:



张芳(1984-),女,河北省保定市人,硕士,研究实习员,主要研究方向为高功率微波技术、太赫兹源器件仿真研究. email:faccyzhang@gmail.com.

董焜(1981-),男,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。

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。

孙会芳(1974-),女,山东省德州市人,硕士,助理研究员,研究方向为高功率微波技术。