

文章编号: 2095-4980(2022)04-0312-07

环形阴极低截止电子枪理论和模拟

高紫纶, 魏义学, 郝保良, 王娟, 徐光

(中国电子科技集团公司 第十二研究所, 北京 100015)

摘要: 提出一种新型的低截止电压环形阴极聚焦极控电子枪结构。在传统皮尔斯电子枪和杆控电子枪基础上, 创新性地将球面阴极设计为环形发射区和不发射锥体区两部分, 以实现更低的聚焦极截止电压, 降低调制器单元的开关损耗, 提升最大调制频率。研究表明, 在导流系数为 $0.53 \mu\text{P}$ 的条件下, 通过引入不发射锥形体, 使阴极的截止电压降低一半, 截止电压幅值由 $1\ 250\ \text{V}$ 降至 $600\ \text{V}$, 对应电源调制器的等效调制损耗降低为 $1/4$, 可使最大调制频率提高 4 倍, 对电子对抗和雷达等应用系统的性能提升具有重要意义。

关键词: 聚焦极; 截止电压; 环形阴极; 电子枪; 太赫兹行波管

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021422

Theoretical and simulation study of annular cathode low cut-off electron gun for terahertz traveling wave tube

GAO Zilun, WEI Yixue, HAO Baoliang, WANG Juan, XU Guang

(The 12th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: A new low cut-off voltage ring cathode electron gun model is presented in this paper. On the basis of traditional Pierce electron gun and pole-controlled electron gun, the spherical cathode is divided into annular emitting cathode and non-emitting cone to achieve lower focusing pole cut-off voltage, reduce switching loss of modulator unit and increase the maximum modulation frequency. The results show that the cut-off voltage of the cathode can be reduced by half by the introduction of non-emitting cone under the condition of perveance $0.53 \mu\text{P}$, the cut-off voltage amplitude is reduced to $600\ \text{V}$ from $1\ 250\ \text{V}$, the modulation loss of the corresponding power modulator is reduced to $1/4$, or the modulation frequency is increased by four times, which is of great significance to the improvement of electronic countermeasures and radar system performance.

Keywords: focusing electrode; cut-off voltage; annular cathode; electron gun; terahertz traveling wave tube

真空电子器件广泛用于雷达、通信、电子对抗及医疗、工业微波等系统中, 持续支撑现代文明社会发展^[1]。作为得天独厚的宽频带、大功率、高效率器件, 行波管正处于快速发展阶段, 在频率、带宽、功率、集成度及设计、制造等领域技术持续进步, 推动了新一代系统发展^[2-4]。

针对军用雷达和电子对抗系统, 除传统的频率、带宽、功率、效率及体积参数等特性以外, 由于战场的电磁环境复杂化和大功率攻击的普遍化, 要求行波管放大器(传统发射机或高集成度微波功率模块)具备高速、高灵敏度收发隔离、多目标对抗及跟踪、超短脉冲抗干扰等更为复杂、更加灵活的能力。为此, 行波管放大器的调制频率须从传统的 $1\sim 100\ \text{kHz}$ 提升至 $300\ \text{kHz}\sim 1\ \text{MHz}$ ^[5-8]。

调制器的调制频率能力主要受制于调制电压幅度、开关损耗及散热能力。为提高调制频率, 调制器模块的散热需要更先进的工艺和材料支撑, 如采用散热更好的碳化硅基板代替氧化铝基板。另一方面, 降低调制器的热源可直接提升调制频率, 但电子枪的结构限制了其分布电容处于 $50\sim 100\ \text{pF}$, 大幅降低较难, 因此热源主要取决于调制电压幅值这一参数。

追求低截止电压电子枪伴随着电子枪的发展历程。自 Pierce^[9]总结发表了聚焦极控制电子枪的设计方法, 学

者们便注意到皮尔斯方法设计出的电子枪采用聚焦极控制, 虽然结构简单, 寿命长, 但截止电压幅值较高, 以目前工程应用较多的皮尔斯电子枪为例, 导流系数一般不低于 $0.5 \mu\text{P}$, 此时截止电压约为 $0.4\sim 0.7$ 倍工作电压, 幅值达千伏, 不利于行波管的快速调制。Wolkstein^[10]设计出栅控枪用于行波管, 栅控枪截止电压很低, 调制电压幅值通常为 $0.01\sim 0.1$ 倍工作电压, 幅值一般为 500 伏级, 但由于栅极工作时需要多一路正极性电源, 增加了电源复杂度^[11-12]; 另一方面, 栅网也会截获部分电流, 导致栅控枪存在热可靠性差、寿命短等系列问题。为了解决栅网截获电流的问题, Forbess^[13]提出了无截获栅控枪结构, 将栅网 $10\%\sim 15\%$ 的截获电流降低至 0.11% ; 但无截获栅控枪增加了一层紧贴阴极表面的阴影栅, 该栅网表面涂覆的高逸出功膜层材料会扩散至阴极表面, 极大影响了阴极的发射性能, 阴极也存在寿命短的问题。Gallagher^[14]提出了杆控枪的结构, 穿过环形阴极中心的控制杆与聚焦极同电位, 在降低截止电压的同时不会截获电流, 解决了聚焦极控电子枪截止电压过高和栅控枪阴极寿命短的问题, 但控制杆复杂的结构和较大的尺寸使杆控枪结构仅适用于低频段、大尺寸行波管^[15]。

本文设计了一种新型的低截止电压环形阴极聚焦极控电子枪, 将传统的球面阴极分为环形发射部分和不发射锥形体(后文均称此结构为阴极锥)两部分, 阴极与不发射锥形体等电位。与栅控枪和杆控枪相比, 该结构具有调制电压低、阴极寿命长、结构简单的综合优点, 适用于高频率、小型化的行波管发展要求。

本研究以太赫兹行波管用电子枪为原型, 该枪导流系数 $0.53 \mu\text{P}$, 工作电压 $4\ 500\ \text{V}$, 截止电压 $-1\ 250\ \text{V}$ 。通过同电位环形阴极和不发射锥形体引入、物理尺寸优化、电子光学系统三维仿真等研究工作, 实现了聚焦极截止电压幅值降低一半, 降幅达到 $600\ \text{V}$, 意味着等效调制损耗降低为 $1/4$, 或调制频率提高 4 倍。

1 理论分析

1.1 阴极发射的截止

在实际工作时, 电子枪的阴极工作在空间电荷限制状态, 在忽略电子初速度影响的条件下, 发射电流密度与极间位置和极间电位存在如下关系^[16]:

$$j = \frac{16\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U^{3/2}}{(-\alpha)^2 R_K^2} \quad (1)$$

式中: j 为阴极发射电流密度; ϵ_0 为真空介电常数; e 为电子电荷量; m 为电子质量; R_K 表示阴极曲率半径; U 对应 r 位置的电位; $(-\alpha)$ 为球形二极管的朗缪尔函数, 级数展开的前几项为:

$$(-\alpha) = \ln\left(\frac{R_K}{r}\right) + 0.3\left(\ln\frac{R_K}{r}\right)^2 + 0.075\left(\ln\frac{R_K}{r}\right)^3 + \dots \quad (2)$$

结合式(3)可以看出, 阴极截止时, $j=0$, 必须要 $U=0$, r 可以为极间任意值。对于电子枪结构, 就要求聚焦极为负电位, 通过在阴阳极之间引入零电位, 使阴极截止发射。这一过程可以直观理解为聚焦极通过对阴极施加的负电位逐渐屏蔽阳极的正电位, 使阴极截止发射。屏蔽的依据取决于聚焦极的电位能否使 $U=0\ \text{V}$ 电位覆盖阴极表面。如图1所示, 原型电子枪的阴极电位为 $0\ \text{V}$, 阳极电位为 $+4\ 500\ \text{V}$, 聚焦极电位取 $-900\ \text{V}$ (该电子枪完全截止时的聚焦极截止电压为 $-1\ 250\ \text{V}$), 仿真表明, 此时电子枪处于不完全截止状态, 阴极中部存在电流发射现象, 仅 $U=0\ \text{V}$ 等电位线覆盖的阴极部分截止发射, 仿真结果与理论分析一致。

降低电子枪的截止电压, 重点在于控制电子枪区的电位分布。电子枪区的电位分布由电极电位分布和空间电荷分布两部分共同决定。传统聚焦极控电子枪一方面聚焦极距离阴极中心较远; 另一方面阴极中心区域电位分布受阳极透镜效应影响最大, 降低了聚焦极控制阴极中部发射的有效性, 这即是聚焦极控电子枪截止电压幅值普遍偏高的本质原因。以现有电子枪为例, 截止阴极最后 5% (此时主要为阴极中部发射)的发射电流所需要的聚焦极电压幅值占截止电压幅值的比例达到了近 40% 。

1.2 电子枪结构设计思路

传统聚焦极控电子枪结构如图2(a)所示, 为降低截止电压, 考虑将阴极设计为环形阴极, 使最难截止的阴极

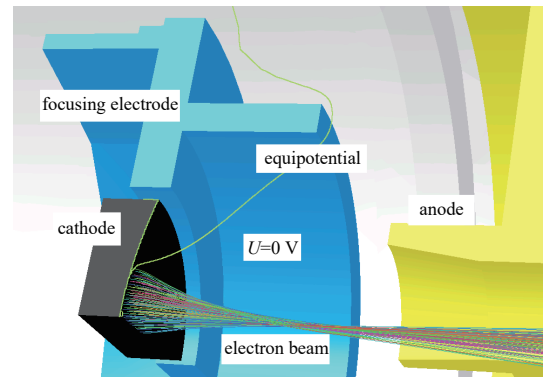


Fig.1 3D simulation results of electron gun incomplete cut-off
图1 电子枪不完全截止状态3D仿真结果

中心区域无电子发射，同时在阴极中心设置阴极锥结构，电子枪结构如图 2(b)所示。在电子枪正常工作时，阴极锥用来维持内层电子注边缘的电位分布，保持电子注的层流性；在电子枪截止的过程中，阴极锥突出于阴极前方，可以降低电子枪区中心区域电位，减小阳极电位渗透影响，相当于增加了聚焦极对阴极中心空间电位分布的控制能力，聚焦极能够以较低的电压使阴极截止。

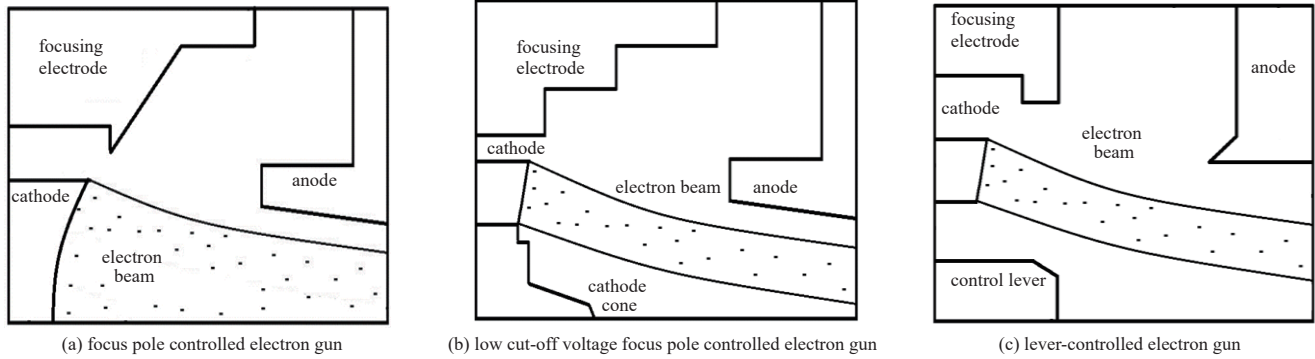


Fig.2 R-Z plane structure of electron gun
图2 电子枪 R-Z 平面结构示意图

特别的，阴极锥嵌入环形阴极中心，无论电子枪处于正常工作还是截止状态，阴极锥均与阴极同电位。区别于杆控电子枪，如图 2(c)所示。从设计角度看：阴极锥的设计简化了电子枪的结构，不需要考虑控制杆与阴极间的绝缘；从工艺角度看：一方面在装配时，阴极锥结构比杆控枪更容易保证零件配合的同轴度^[16]；另一方面热丝可以同时加热阴极和阴极锥，热丝不需要绕制为环状，工艺难度更低，在高频率、小型化行波管研究中具有重要意义。

2 电子光学结构设计

2.1 阴极组件

低截止电压环形阴极电子枪的阴极组件应包括阴极支持筒、热丝、阴极基体(环形)及阴极锥四部分。其中，环形阴极与阴极锥组合，其结构对于电子发射和电子注的维持起至关重要的作用，重点要确定环形阴极的内径、外径、阴极的曲率半径以及阴极锥的高度。环形阴极的内外径由电子枪导流系数、聚焦极截止电压以及阴极平均电流发射密度共同决定：

$$\bar{j} = \frac{I}{\pi(r_{外}^2 - r_{内}^2)} \tag{3}$$

式中： \bar{j} 为阴极的平均负荷； I 为阴极发射电流； $r_{外}$ 和 $r_{内}$ 分别为环形阴极的外径和内径。给定设计导流系数和截止电压，聚焦极能够截止宽度约为 0.6 mm 的环形区域，即确定了环形阴极环的宽度 $r_{外} - r_{内}$ 。可以计算出一组满足条件的 $r_{外} = 1.8$ mm 和 $r_{内} = 1.4$ mm(阴极和聚焦极间隔 0.15~0.20 mm)。

初步确定阴极结构后，在阴极中心设置阴极锥。阴极锥用于维持内层电子注边缘的电位分布，减小截止状态阳极电位的影响。阴极锥结构可用圆锥的底面半径 r 和圆锥的高 h 两个关键参数来描述。仿真计算表明，电子枪发射电流和截止电压随阴极锥结构的高度 h 变化比较敏感，且为保证电子注的层流性，锥的高度应限制在阴阳极距离的 20%~30% 之间。图 3 给出了电子枪发射电流和聚焦极电位 -500 V 时，漏电流随阴极锥结构高度的变化(阴极锥高度为 0.6~0.7 mm，聚焦极电压为 -600 V 时，阴极已处于截止状态)。随着锥高度增加，漏电流减小，即截止电压幅值随锥高度增加而减小；同时电子枪正常工作时的发射电流也有所减小，直观反映出阴极锥在电子枪截止和工作状态对阳极电位的屏蔽作用。虽然锥高度会同时影响截止电压和发射电流，但发射电流随锥高度的变化呈现出非常好的线性特性，根据这一规律可以快速确定阴极锥的高度为 0.64 mm。

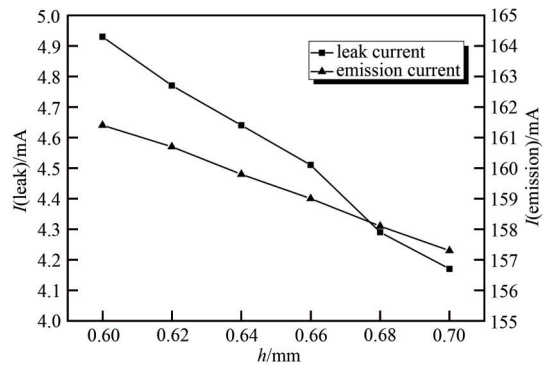


Fig.3 Emission current and leak current of electron gun varying with the height of cone structure
图3 电子枪工作电流与漏电流随锥形结构高度的变化

阴极中心加入阴极锥可以显著降低电子枪的截止电压，但还需要特别关注阴极表面的发射一致性。传统结构的电子枪在修正阳孔效应时，会造成阴极面发射不均匀。同时，由于阴极边缘的尖端效应，会导致电场变强，发射电流骤增。这些都导致阴极发射出现“边大内小”的现象。对于相同参数要求的电子枪，环形阴极的发射面积更小，阴极平均负荷接近 4 A/cm^2 。在电子枪的设计过程中，需要特别注意阴极表面的发射一致性^[17]，避免阴极边缘发射电流密度过大而处于温度限制状态。

阴极表面形状应根据电子枪工作时的空间电位分布来确定。由于阴极锥的加入，阴极前方电位等位面分布近似呈锥面而非球面，因此需将阴极发射面按电位分布设计为锥面，保证阴极的发射一致性。图 4 为阴极表面的发射电流密度，将阴极面变为锥面后，阴极整体发射一致性较好。

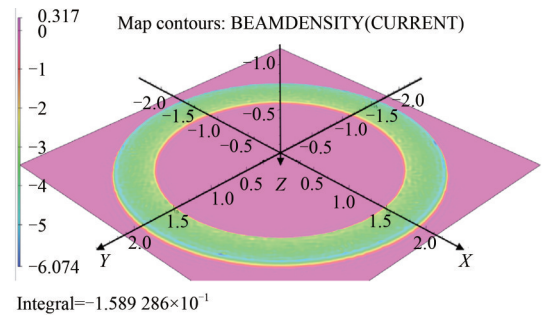


Fig.4 Emission current density distribution of cathode
图 4 阴极发射电流密度分布

2.2 聚焦极与阳极

除了对阴极组件结构进行设计外，还需对聚焦极及阳极结构进行设计。通常情况下，由于电子枪的导流系数不变，在阴极结构尺寸确定的条件下，聚焦极与阳极可以在已知电子枪结构的基础上通过缩尺原理得到。但由于电子注状态与原电子枪不同，缩尺原理得到的聚焦极与阳极尺寸并不能很好地满足要求，其电子轨迹如图 5 所示。此时阴极的发射电流为 146.2 mA ，且外层电子轨迹边缘与阳极距离过于接近，工作时容易截获电流。根据电子枪的性能指标要求，缩短阴阳极之间的距离，更改聚焦极形状等方法可以增加发射电流。通过上述方法增加发射电流后，电子枪区正常工作和截止时的电位分布会发生变化，可能会使电流被阳极截获或截止电压幅值上升，因此对于聚焦极和阳极形状的仿真优化需在电子枪正常工作和截止状态的双重指标下交叉进行^[18]，最终得到符合要求的电子枪结构模型如图 6 所示。

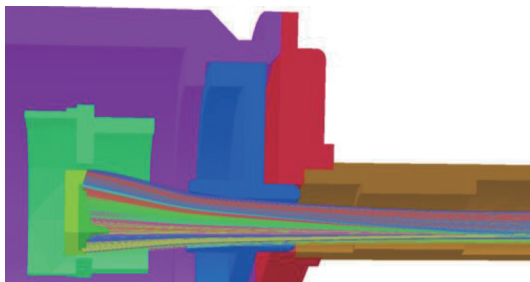


Fig.5 Electron trajectories calculated by scaling principle
图 5 缩尺原理计算出的电子轨迹



Fig.6 Structure model of electron gun
图 6 电子枪结构模型

3 仿真结果

采用 Opera 和 MTSS 软件对加入阴极锥结构的电子枪进行模拟。得到的电子枪区电子注轨迹如图 7 所示。图 7(a) 为 MTSS 计算结果，得到阴极发射电流为 158.0 mA ，注腰位置 11.52 mm ，注腰半径 0.51 mm ，射程 8.91 mm ；图 7(b) 为 Opera 计算结果，得到阴极发射电流为 159.1 mA ，注腰位置 11.50 mm ，注腰半径 0.50 mm ，射程 8.90 mm ，计算结果基本一致。

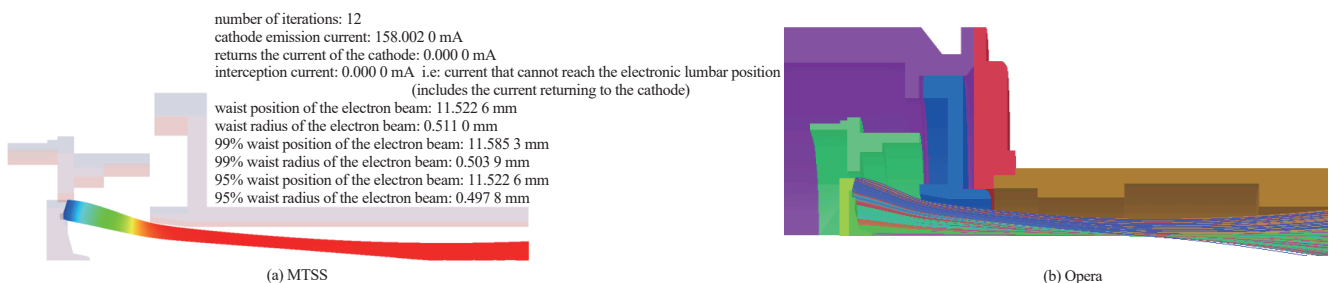


Fig.7 Electron trajectory in the electron gun region
图 7 电子枪区电子注轨迹

电子枪产生的电子注可以采用电磁聚焦、均匀磁场聚焦和周期永磁聚焦等多种方法。以周期永磁聚焦为例，

加入磁场后三维电子注轨迹如图 8 所示，电子注可以完整通过周期永磁聚焦系统。图 9 为电子枪 $R-Z$ 平面二维电子注轨迹以及对应位置沿 Z 方向的磁感应强度^[19-20]。

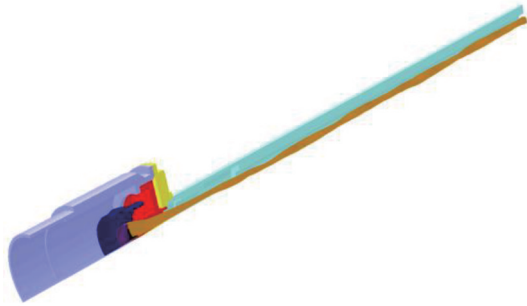


Fig.8 3D trajectory of electron gun
图 8 电子枪 3D 电子注轨迹

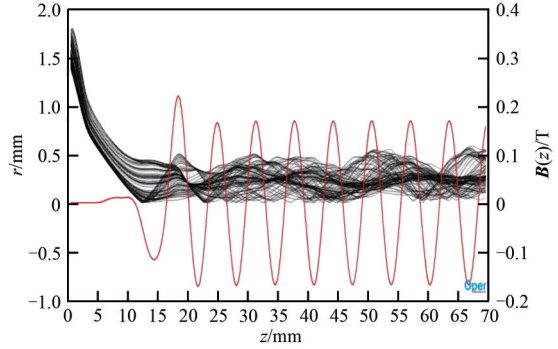


Fig.9 Trajectory and magnetic induction intensity distribution in $R-Z$ plane
图 9 $R-Z$ 平面电子轨迹及磁感应强度分布

在电子注轨迹不同位置处设置截面，绘制电子注在不同位置的电流密度分布，如图 10 所示。空心电子注会聚至注腰位置时，内层电子(约 10 mA)由于无法满足入射磁场的初始条件，电子轨迹始终在 $r=0\sim 0.50$ mm 范围内波动。外层电子失去内层电子的空间电荷力，在磁场作用下，注半径减小，最终在 $r=0.15\sim 0.35$ mm 范围内稳定向前传输。此外，环形阴极使电子注更多位于相互作用空间电磁波纵向场较大区域，克服了电磁波在电子注通道中心区域凋落过大造成的太赫兹行波管低注波相互作用效率问题。

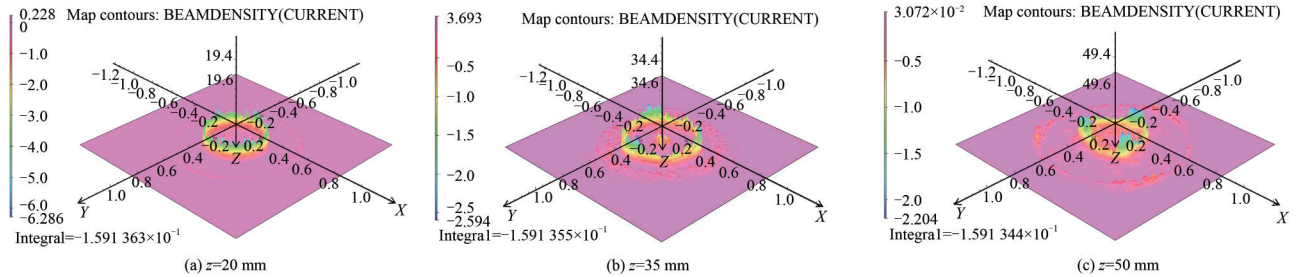


Fig.10 Current density distribution of electron beam
图 10 电子注电流密度分布

对电子枪截止状态进行仿真，结果表明，采用环形阴极及阴极锥结构的电子枪设计可以将聚焦极控制电子枪截止电压幅值由 1 250 V 降至 600 V。图 11 为传统结构电子枪聚焦极为 -600 V 时的结果。可以看到，电子枪处于异常状态。此时漏电流大于 20 mA，且电子轨迹交叉严重，层流性极差。表 1 给出了相同导流系数下，传统聚焦极控制电子枪(传统结构)与加入阴极锥结构的电子枪(低截止结构)的性能参数比较。除射程以外，其他电参数相同，设计出截止电压幅值仅为 600 V 的电子枪，性能得到了大幅提升。

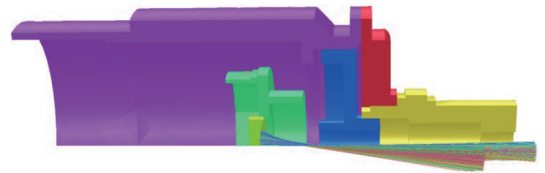


Fig.11 Working state of electron gun at -600 V focusing electrode
图 11 聚焦极 -600 V 时电子枪的工作状态

表 1 仿真结果

Table1 Results of simulation

parameter	traditional structure parameter value	low cut-off structure parameter value
cathode radius/mm	1.4	1.4~1.8
cathode current/mA	160.0	159.1
cathode load/(A·cm ⁻²)	2.60	3.95
cut off voltage/V	-1 250	-600
electron beam radius/mm	0.35	0.15~0.35
range/mm	4.2	8.9

4 结论

本文以电子枪截止原理为基础,提出了采用环形阴极和阴极锥的新结构设计,用于降低聚焦极控制电子枪截止电压。采用Opera和MTSS软件仿真优化,在相同导流系数的情况下,将原聚焦极控制电子枪1250V的截止电压幅值降至600V。利用周期磁场,将电子注半径维持在0.5mm之内。本文所设计的结构,可以降低调制器单元的开关损耗,相比栅控枪、杆控枪均有独特的优势和竞争力,极大程度拓展了聚焦极控制电子枪的应用场合,为微波管的小型化设计提供了便利,对电子对抗和雷达系统性能提升有重要意义。

参考文献:

- [1] GILMOUR A S. Microwave and millimeter-wave vacuum electron devices[M]. Boston:Artech House, 2020:1-12.
- [2] The vacuum electron device IPP rethinking what we know about vacuum electronic devices[J]. The Journal of Electronic Defense, 2019,42(2):1-4.
- [3] LEVUSH B. The design and manufacture of vacuum electronic amplifiers:progress and challenges[C]// Proc of IVEC. Busan, Korea:IEEE, 2019:1-5.
- [4] 曹林林,肖刘,尚新文,等. Ku波段高效率功率可调空间行波管研制[J]. 电子科技大学学报, 2021,50(3):347-353. (CAO Linlin, XIAO Liu, SHANG Xinwen, et al. Development of Ku-band high efficiency power flexible space Traveling Wave Tube[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021,50(3):347-353.)
- [5] 李建兵,林鹏飞,郝保良,等. 微波功率放大器发展概述[J]. 强激光与粒子束, 2020,32(7):66-73. (LI Jianbing, LIN Pengfei, HAO Baoliang, et al. Overview of development of microwave power amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020,32(7):66-73.)
- [6] 王斌,王风岩,周旭,等. 微波功率行波管及模块的应用发展趋势[J]. 真空电子技术, 2019(2):1-7. (WANG Bin, WANG Fengyan, ZHOU Xu, et al. Application and development trend of TWTs and MPMs[J]. Vacuum Electronics, 2019(2):1-7.)
- [7] 杜凌志. 大功率毫米波电源模块研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (DU Lingzhi. Research on high power millimeter wave power supply module[D]. Chengdu, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2021.)
- [8] 韩壮志,吴玉柱,梁梦涛,等. 连续波雷达微带天线收发隔离技术综述[J]. 电子元件与材料, 2020,39(10):17-24. (HAN Zhuangzhi, WU Yuzhu, LIANG Mengtao, et al. Transceiver isolation technology for continuous radar microstrip antenna:a review[J]. Electronic Components and Materials, 2020,39(10):17-24.)
- [9] PIERCE J R. Theory and design of electron beams[M]. Van Nostrand:New York, 1954.
- [10] WOLKSTEIN H J, NOVAK G. A grid controlled medium power travelling-wave tube using periodic focusing[J]. IRE Transactions on Electron Devices, 1958,3(2):116.
- [11] 朱亚力. 一种用于行波管的毫秒栅极调制器[J]. 雷达与对抗, 2003,5(3):43-45. (ZHU Yali. A millimicrosecond grid modulator for TWT[J]. Radar and Countermeasures, 2003,5(3):43-45.)
- [12] 陈娇娇,熊长征,张权. 应用于强流电子枪的脉冲电源研究[J]. 通信电源技术, 2017,5(34):1-8. (CHEN Jiaojiao, XIONG Changzheng, ZHANG Quan. Research on pulse power supply for high current electron gun[J]. Telecom Power Technology, 2017,5(34):1-8.)
- [13] FORBESS R A. An advanced type of non-intercepting grid for convergent beam electron guns[C]// International Electron Devices Meeting. Los Angeles:IEEE, 1965:32.
- [14] GALLAGHER H E. The design and performance of grid-controlled high-perveance electron guns[J]. IRE Transactions on Electron Devices, 1959,6(4):390-396.
- [15] 宋田英,邓清东,贺兆昌. 用于杆控双模行波管的高精度空心阴极组件的装配技术[J]. 真空电子技术, 2013(1):59-61. (SONG Tianying, DENG Qingdong, HE Zhaochang. Assembly technic of high precision hollow center cathode used in pole controlled double model-TWT[J]. Vacuum Electronics, 2013(1):59-61.)
- [16] 电子管设计手册编辑委员会. 微波管电子光学系统设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1981:19-64. (Electronic tube design manual editorial board. Microwave tube electronic optical system design manual[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1981:19-64.)
- [17] 彭宇飞. 热阴极发射非均匀性对本征发射度的影响[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2020. (PENG Yufei. Influence of emission nonuniformity of thermionic cathode on intrinsic emittance[D]. Mianyang, China: China Academy of Engineering Physics, 2020.)
- [18] 刘军乐,邵文生,于志强. 基于热阴极的相对论返波管电子枪设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):131-134. (LIU Junle, SHAO Wensheng, YU Zhiqiang. Design of electron gun of relativistic backward wave oscillator based on thermionic

- cathode[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):131–134.)
- [19] 廖平,杨中海,廖莉. 毫米波行波管电子光学系统计算机模拟[J]. 电子科技大学学报, 2005,34(6):794–797. (LIAO Ping,YANG Zhonghai,LIAO Li. Electron beam optics system computer simulation for MMW TWTs[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005,34(6):794–797.)
- [20] 魏元璋. 强流相对论环形电子束的周期磁场引导技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (WEI Yuanzhang. Study on periodic magnetic field guiding technology of annular intense relativistic electron beam[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)

作者简介:

高紫纶(1996-), 男, 内蒙古包头市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为行波管电子光学系统 .email: 2579072375@qq.com.

魏义学(1968-), 男, 研究员级高工, 硕士生导师, 主要研究方向为宽带连续波幅相一致性行波管和空间行波管研究.