

文章编号: 2095-4980(2018)01-0131-04

基于热阴极的相对论返波管电子枪设计

刘军乐, 邵文生, 于志强

(北京真空电子技术研究所, 北京 100015)

摘要: 近年来热阴极特别是钨系阴极得到充分发展, 有望成为高功率微波的电子源。提出一种基于热阴极的新型“面包圈”式电子枪模型, 以此电子枪作为相对论返波管的环形电子束发射源。通过仿真软件CST PARTICLE STUDIO对模型进行仿真验证, 所得电子枪发射电流为786 A, 阴极发射电流密度为30 A/cm², 电子束密度为305 A/cm², 电子通过率为99.9%。最后对热阴极在高功率微波器件中的应用进行了初步探索。

关键词: 环形电子束; 热阴极; 相对论返波管; 高功率微波

中图分类号: TN125

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0131

Design of electron gun of relativistic backward wave oscillator based on thermionic cathode

LIU Junle, SHAO Wensheng, YU Zhiqiang

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: Having been fully developed in recent years, thermionic cathodes, especially scandate cathodes, are promised to be the electron source of high power microwave devices. A novel bagel-shaped E-gun based on thermionic cathode is proposed and used as the annular electron beam source of relativistic backward wave oscillator. The emission current of this model is obtained to be 786 A, the emission current density of cathode 30 A/cm², the electron beam density 305 A/cm², and the electron pass rate 99.9% via simulating the E-gun with CST particle studio. The application of thermionic cathodes in high power microwave device is also explored.

Keywords: annular electron beam; thermionic cathode; relativistic backward wave oscillator; high power microwave

高功率微波是指频率在100 MHz~300 GHz、峰值功率在100 MW以上的强电磁辐射^[1]。高功率微波武器是利用定向发射的高功率微波束破坏敌方电子设备、杀伤敌方人员的一种定向能武器^[2]。高功率微波武器具有“弹仓”大、光速攻击、发射成本低等优点^[3-4], 在现代战争中至关重要, 因此对高功率微波的研究具有重大意义。

相对论返波管是高功率微波源之一, 它利用慢波结构上的返波与电子注相互作用, 产生自激振荡并放大, 具有高功率、高效率、适合重复频率工作等特点^[5-6], 其输出微波脉冲功率从几百 MW 到数 GW, 转换效率约为10%~50%^[7], 微波频率可达 X_K 波段, 甚至更高。相对论返波管采用空心环形电子束, 可大大降低电子束中的库伦电位, 承载比实心束更大的电流^[8]。目前相对论返波管所用阴极大多为爆炸式发射阴极^[9], 发射电流可达上千安培。

热阴极因其发射电流较小, 无法满足高功率微波应用, 一直未被采用。经过多年发展, 钨系阴极逐渐向高稳定性、大发射密度和大发射面面积等方向发展, 是热阴极中最有可能达到高功率微波器件电流密度要求的阴极。钨系阴极自使用以来一直受到重视, 是当今阴极的主要研究方向, 各热阴极研究部门均重点对此类阴极进行了相关研究。中国电子科技集团公司第十二研究所制备出直径100 mm的大尺寸钨酸盐阴极, 在工作温度1120℃下, 获得最大电流1038 A^[10]。Van Esdonr J 制成的钨酸盐阴极在950℃时能提供约100 A/cm²的电流密度, 且有足够长的寿命, 此外脉冲激光沉淀技术顶层钨酸盐类型阴极所得脉冲发射密度可达400 A/cm²^[11]。与爆炸式发射阴极相比, 热阴极拥有良好的可重复性和更长的寿命, 可满足高功率微波源长时间重复工作。俄罗斯应用物理研究

收稿日期: 2017-08-23; 修回日期: 2017-10-09

所的一个研究小组曾采用特殊材料的热发射阴极来替代爆炸式发射阴极,取得较好效果^[12],因此当高功率微波需要较低能流电子束时,热阴极足以胜任。本文使用热阴极作为电子发射源,设计环形电子枪,并对模型进行优化验证,结果表明所设计电子枪满足设计目标。

1 电子枪设计

某相对论返波管对电子源的需求为:在阳极电压为 200 kV 下,获取一束电流为 1 000 A 的环形电子束,电子束厚度小于 2.5 mm,平均半径约为 20 mm。若相对论返波管有 50%的工作效率,则其输出功率可达 100 MW。在优化过程中发现,当电流达到 1 000 A 时,部件场强过高。为验证本类电子枪可用于高功率微波,本文先对电流大于 750 A 时的电子枪性能进行仿真验证,为下一步验证电流大于 1 000 A 做出前期探索。

热阴极电子枪主要分为皮尔斯电子枪、磁控注入电子枪与带状注电子枪。皮尔斯电子枪导流系数较低,无法满足设计要求;磁控注入电子枪虽在一定程度上可实现高导流系数,但其横纵速度比太大^[13],无法应用于整管;带状注电子枪输出为一定尺寸的带状电子束,将带状电子束折叠便可获得圆形电子束,电子枪各部件也相应改为轴对称部件。为使电子束从阴极发出后保持圆环形,电子枪应包括阴极、内聚焦极、外聚焦极、内阳极以及外阳极 5 部分。阴极发射面的轮廓为环圈形,故将电子枪取名为“面包圈”式电子枪。在“面包圈”式电子枪中,电子从环形阴极发出,经过聚焦作用穿过阳极孔隙,形成具有一定电流密度的电子束。此类电子枪尚处于探索阶段,没有基础的尺寸公式指导建模,只能根据阴极实际所能达到的发射水平来规划阴极大小,并调整聚焦极与阳极形状,使从阴极发射的电流可以聚焦成环。本文假定阴极的平均脉冲电流密度可达到 30 A/cm²,环形阴极面积为 25 cm²,符合实际情况。

软件中阴极发射类型设置为热阴极发射,阴极零场电流密度方程为:

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

式中: $A_0 = 1.202 \times 10^6$ A/(m²·K²) 为常数; T 为温度; e 为自然常数; ϕ_M 为逸出功; k 为玻尔兹曼常数。本文逸出功取为 1.5 eV,温度为 1 300 K,经计算,最大电流密度为 316 A/cm²。在实际阴极中,电子发射是一个复杂的过程,其发射能力还受表面场强、真空度等因素影响,聚焦极的电势以及形状变化也会对空间电场分布产生影响。本文主要工作是进一步改变电子束结构,调整模型的形状、电势等,本文所建立电子枪初始模型如图 1 所示。

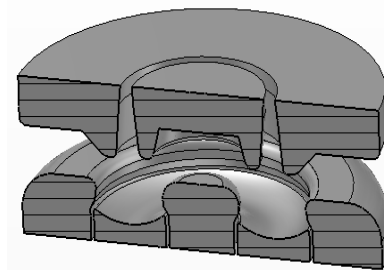


Fig.1 E-gun model
图 1 电子枪模型

2 仿真优化

电子枪性能指标主要包括电子通过率、输出束流密度及场强。电子通过率不高,聚焦极和阳极会截获大量电子,电子碰撞会使部件发热甚至烧毁电子枪。不同相对论返波管对通过慢波结构的电子束有不同要求,一般使用束流密度大的电子束会获得更好的输出。场强决定着电子枪部件的安全性,设计时应尽量降低场强大小。

设置电压与边界条件后,对模型进行仿真,可以得到电子枪电子截获信息。在初始模型中,电子截获过大,必须针对通过率对模型进行优化。优化过程中要考虑电流大小、阳极截获等指标,主要优化对象为聚焦极、阳极的形状与电势。初始模型中,电子有很大一部分截获于阳极,调整聚焦极电压与形状,改善电子通过率,使阳极孔隙与阴极之间的电位分布类似于折叠为环形的带状注电子枪。调整聚焦极可能会使发射电流变小,在 CST 中通过增大发射面的场强来增大发射电流。通过仿真实验得知:缩短阴阳极间的距离,提高聚焦极电压,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,阴阳极之间的电场分布会发生变化,这可能会使电子重新截获于阳极,因此第 1 步仿真优化是在提升电流大小与改善电子通过率双重指标下交叉进行,最终得到通过率良好且电流大小符合要求的电子枪模型。电流大小确定后,增加电流密度的方法是使电子环变得更薄,电子从阴极面射出后,聚焦极使电子环向阳极孔隙靠拢,进入到阳极孔后,电子在水平方向的速度分量使电子进一步聚拢,随后电子因为空间电荷斥力而趋于分散,这时调整阳极孔长度,获得最薄环形电子束。设计电子枪阳极孔隙宽度时应略大于设计要求,为电子束传输留出一定的空间。确定尺寸后,对部件进一步优化,以降低场强,避免尖端场强效应。降低场强最常见的办法是进行倒角变化,倒角过大,会改变部件尺寸从而影响电子束聚焦性,在优化过程中一般采取较小倒角。当必须采用大的倒角变化时,则需重复上述优化过程,以获取高通过率的电子

束。经过上述优化后,可得到一把聚焦性能良好的环形电子枪,所得电子轨迹信息如图 2 所示,图中“Background”未受到电子碰撞,是因为在建模过程中选取了较大的背景空间。

## Collision information of particle source particle1						
Component	Solid	Hits	Energy (eV)	Charge (C)	Current (A)	Power (W)
-----	-----	----	-----	-----	-----	-----
cathode	solid1	0	0.0	0.0	0.0	0.0
Focus-I	solid2	0	0.0	0.0	0.0	0.0
Focus-O	solid3	0	0.0	0.0	0.0	0.0
Anode-O	solid4	6	1.194e+006	-9.613e-019	1.052e-001	2.089e+004
anode-I	solid5	20	3.992e+006	-3.204e-018	7.726e-001	1.544e+005
[Background]	Boundary	0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fig.2 Intercepted electronics information

图 2 电子截获信息

在软件中可以得到电子枪阴阳极之间的电位分布,如图 3 所示。阴阳极之间电位分布与折叠的带状注电子枪模型类似,依靠电子枪聚焦极抵消阳极孔效应。电场强度矢量垂直于电位线,表示阴阳极之间电子受力方向,电子从阴极发出后运动趋势由电场强度矢量决定。电场强度幅值分布如图 4 所示,在加工选材时应参考此强度,选用可耐受高场强的材料。

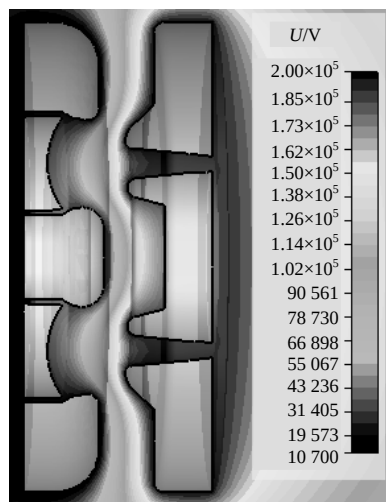


Fig.3 Potential distribution

图 3 电位分布

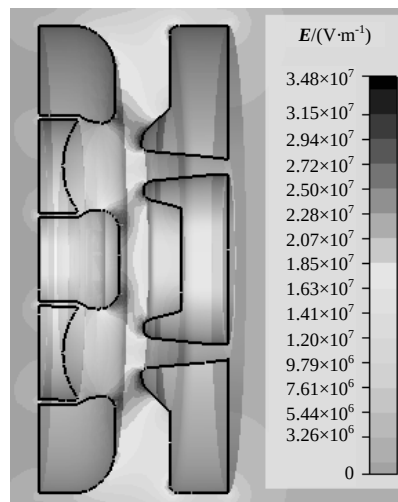


Fig.4 Distribution of electric field strength

图 4 电场强度分布

仿真所得阴极发射电流稳定于 786 A,经计算阴极发射密度为 30 A/cm²,电流大小与迭代次数见图 5。环形电子枪电子通过率为 99.9%,通过在阳极孔后方放置电子检测面,可以得知电子束圆环内外半径分别为 18.5 mm, 20.6 mm,因此电子束平均半径为 19.55 mm,厚度为 2.1 mm,符合最初设计要求,电子轨迹如图 6 所示。根据电子束尺寸与电流大小,可求得环形电子束电流密度为 305 A/cm²。

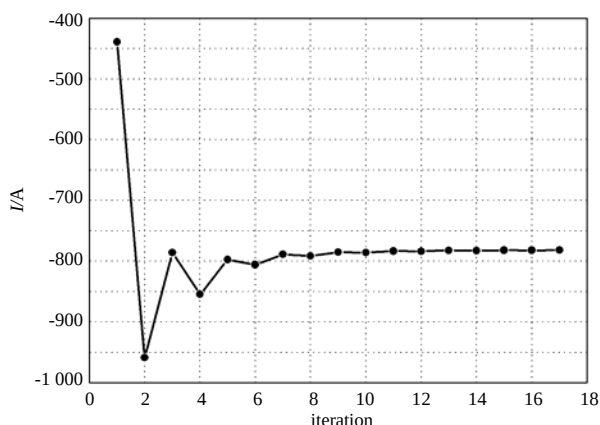


Fig.5 Emission current

图 5 发射电流

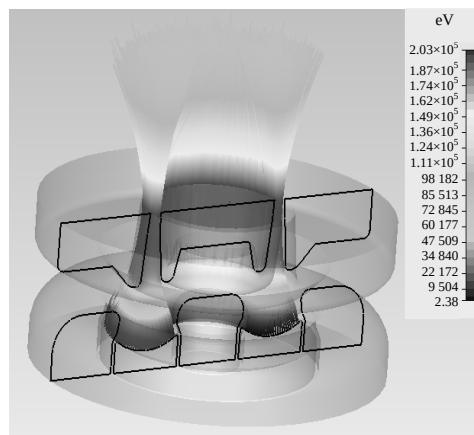


Fig.6 Electronic track

图 6 电子轨迹

3 结论

钨系阴极的发展使其有了成为高功率微波发射源的可能。本文设计出一种基于热阴极的新型“面包圈”式电子枪模型,依据电子束需求建模并对电子通过率、束流密度、场强三方面进行优化,最终获得一把满足设计目标的环形束电子枪,阴极发射电流密度为 30 A/cm^2 ,所得电子束平均半径为 19.5 mm ,厚度为 2.1 mm ,电子束平均电流密度为 305 A/cm^2 ,通过率达到 99.9% ,为热阴极作为相对论返波管的电子发射源起到了一定探索作用。

参考文献:

- [1] GOLD S H, NUSINOVICH G S. Review of high power microwave sources research[J]. Review Scientific Instruments, 1997, 68(11):3945-3974.
- [2] BENFORD J, SWEGLE J, SCHAMLOGLU E. High power microwave[M]. [S.l.]:CRC Press, 2007.
- [3] 陶建义,陈越. 外军高功率微波武器发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011,6(2):111-116. (TAO Jianyi, CHEN Yue. Development of HPM weapon for foreign military[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2011,6(2):111-116.)
- [4] 谭显裕. 高功率微波新概念武器的技术现状和发展[J]. 航空兵器, 2004(1):8-11. (TAN Xianyu. The current technical status and development trends of the new concept HPM weapons[J]. Aero Weaponry, 2004(1):8-11.)
- [5] CHEN Changhua, LIU Guozhi, HUANG Wenhua, et al. A repetitive X-band relativistic backward wave oscillator[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2002,30(3):1108-1111.
- [6] ROSTOV V V, TOTEMENINOV E M, YALANDIN M I. High power relativistic microwave sources based on backward wave oscillator with a modulating resonant reflector[J]. Technical Physics, 2008,53(11):1471-1478.
- [7] JIANG W H, WOOLVERTON K, DICKENS J, et al. High power microwave generation by a coaxial virtual cathode oscillator[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 1999,27(5):1538-1542.
- [8] 周传明,刘国治,刘永贵,等. 高功率微波源[M]. 北京:原子能出版社, 2007. (ZHOU Chuanming, LIU Guozhi, LIU Yonggui, et al. High power microwave source[M]. Beijing:Atomic Energy Press, 2007.)
- [9] 宋法伦,金晓,张永辉,等. 爆炸发射阴极特性的研究进展[J]. 物理, 2007,36(3):241-246. (SONG Falun, JIN Xiao, ZHANG Yonghui, et al. An overview of the properties of explosive emission cathodes[J]. Physics, 2007,36(3):241-246.)
- [10] 方荣,陆玉新. 热阴极的发展现状[J]. 真空电子技术, 2015(1):12-19,29. (FANG Rong, LU Yuxin. The development of thermionic cathodes[J]. Vacuum Electronics, 2015(1):12-19,29.)
- [11] 邵文生,李娜,李兴辉,等. 用于太赫兹真空器件的大电流密度阴极[J]. 真空电子技术, 2013(1):20-26. (SHAO Wensheng, LI Na, LI Xinghui, et al. High current density cathodes for terahertz vacuum devices[J]. Vacuum Electronics, 2013(1):20-26.)
- [12] BARKER R J, SCHAMLOGLU E. High power microwave sources and technologies[M]. [S.l.]:IEEE, 2001.
- [13] 吴浠桥,赵青,董爱香,等. 回旋管电子枪的发展及其评述[J]. 真空电子技术, 2007(1):30-34. (WU Xiqiao, ZHAO Qing, DONG Aixiang, et al. Review of gyrotron electron gun and its development[J]. Vacuum Electronics, 2007(1):30-34.)

作者简介:



刘军乐(1992-),男,河北省衡水市人,在读硕士研究生,主要研究方向为高功率微波.
email:15201351737@163.com.

邵文生(1971-),男,山西省运城市人,研究员,主要研究方向为阴极电子学.

于志强(1977-),男,山西省临汾市人,研究员,主要研究方向为阴极电子学.