一种冷阴极电子枪的模拟研究

汪敏霞 魏世宗 徐季^{*} (南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210000)

Design and Research of a Cold Cathode Electron Gun

WANG Minxia, WEI Shizong, XU Ji*

(School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract In this paper, a kind of micro-focus cold cathode X-ray tube with a very high electron passing rate is established by using Computer Simulation Technology Particle Studio software. The effect of X-ray tube structure on focal point, electron passing rate, and cathode emission current is studied emphatically. In particular, following the structure of the Pierce electron gun, a curved is adopted, and a cathode groove is added on this basis, so that the electron passing rate is increased from 75.21% to 90.26%, while the focus of nearly 500 μ m is reduced to less than 50 μ m. Under the condition that the anode voltage is 90 kV and the gate voltage is 1000 V, the electron pass rate of the cold cathode electron gun can reach 95.41%, and the effective focus size at the anode target surface is about 45 μ m.

Keywords Cold cathode, Groove, Pass rate, Focal point, Cathode emission current

摘要 文章通过 Computer Simulation Technology 粒子工作室软件建立了一种电子通过率极高的微焦点冷阴极电子枪。 重点研究了电子枪自身结构对焦点、电子通过率和阴极发射电流的影响。特别是仿照了皮尔斯电子枪的结构,采用了一种弧 面阴极,并在此基础上增加了一个阴极凹槽,使电子通过率从 75.21% 提高到 90.26%,同时将近 500 μm 的焦点缩小到 50 μm 以内。最终设计出的冷阴极电子枪在阳极电压为 90 kV 且栅极电压为 1 kV 的条件下,电子通过率可达 95.41%,在阳极靶面得 到的束斑有效焦点尺寸约为 45 μm。

关键词 冷阴极 凹槽 通过率 焦点 阴极发射电流 中图分类号: TN24 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202312009

目前,X射线管在医疗检查、无损探伤等诸多 领域都有着十分广泛的应用,作为X射线管核心部 件的电子枪也一直受到业界极大关注。在电子枪 整个结构中,阴极为电子发射源,所以对电子枪性 能影响最大的是阴极结构。电子枪的阴极电子源 分为冷、热两种,热阴极是通过加热给阴极材料内 部电子提供能量将其激发出来,冷阴极一般是通过 外加强电场激发出电子。对比而言,冷阴极电子源 在工作过程无需加热,效率比冷阴极电子源也更高, 同时冷阴极电子枪还解决了热阴极电子枪的大体积、 功耗高、低响应等问题,因此其具有更大的优势^[1]。

国外的 Spindt C A 在 1968 年提出了金属针尖

型的 Spindt 阴极, Spindt 阴极的电流密度较大所以 可以应用在冷阴极真空电子器件中,其缺点是加工 成本昂贵且阴极阵列受到气体的影响后极易损坏。 碳纳米管 (CNTs) 是在 1991 年被科学家发现,其六 边形结构近乎完美、重量轻且具有良好的物理、化 学特性。除此之外,碳纳米管还具有弹性高、比表 面积大、稳定性好和抗疲劳性能等诸多优点^[2]。 2016年,李兴辉等^[3]通过模拟计算实现了一种为工 作电压 40 kV,工作电流 1mA, X 射线焦斑尺寸直径 小于 0.5 mm 的冷阴极电子枪。2022年,祝维等^[4] 通过复合石墨烯和 750℃ 真空高温退火,高压强发 射稳定性得到进一步提高,提供了一种制备强流微

收稿日期:2023-12-21 基金项目:国家自然科学基金项目(92264103)

^{*}联系人: E-mail: 003397@nuist.edu.cn

尺度场发射阴极的有效途径。同年,石晓倩等^[5]设 计了一种能量在 0~2 keV 之间可调、束斑直径可调、 可偏转、可脉冲的高性能电子枪。张扬等^[6]设计了 一种电子通过率可达到 75%,电子束焦点约为 56 µm, 聚束比为 5:1 的电子枪模型。目前,大部分的学者 对冷阴极电子枪的设计关注重点往往是单个部件 的参数对电子枪性能的影响,而对可以同时缩小焦 点尺寸,提高阴极发射电流且提高电子通过率的研 究相对较少,本文就这个问题提供了一种供参考的 解决方案。

1 结构设计

1.1 设计思路

皮尔斯电子枪在 20 世纪中叶被提出,它是由 弧面阴极、聚焦极以及阳极构成。弧面阴极产生的 电子注有着良好的收敛性,因而在微波电真空器件 中应用非常广泛^[7]。仿照皮尔斯电子枪的设计思路, 本研究在建模时采用了用弧面型阴极。为了加强 电子束的汇聚效果,拟定在阴极处加一个凹槽,且 同时增加两个聚焦结构即栅极与聚焦极。

1.2 模型的建立

本文设计的冷阴极电子枪的整体结构如图 1(a) 所示,其中包括阴极发射源、阴极凹槽、栅极、聚焦 极和阳极等主要组件。整个结构采用真空玻璃进 行密封,首先在栅极施加一定的电压牵拉出阴极发 射的电子束,聚焦极对电子束有一定的汇聚作用, 电子束通过聚焦极后便到达阳极靶材,产生 X 射线^[8]。 其中阴极仿照皮尔斯电子枪的设计,采用了弧面阴 极如图 1(b) 所示,其中红点覆盖的一面即为阴极发 射面。

1.3 仿真软件及流程

Computer Simulation Technology (CST) 是一种 三维电磁仿真软件,其中包含了 8 个工作室子软件。 本研究主要运用到 CST 软件中的粒子工作室软件, 完成对冷阴极电子枪的建模与仿真分析,具体仿真 流程如下。

(1) 打开工作界面

在CST中选择带电粒子动力学(Charged Particle Dynamics)里面的真空电子器件(Vacuum Electronic Devices)工作模块,并选择电子枪(Particle Gun)模型,求解器选择粒子追踪(Particle Tracking)



图1 电子枪结构图。(a) 整体模型结构图, (b) 弧面阴极

Fig. 1 Electron gun structure diagram. (a) The overall model structure, (b) curved cathode

求解器。

(2) 建立好各个电极并设置参数

建立阴极模型并选择电子发射面,设定发射类型为场致发射 (Field-induced)。再建立栅极、聚焦极与阳极的模型并分别设置初始电压。其中栅极预设电压为 2500 V,阳极电压预设为 200 kV,聚焦极和阴极电压均预设为 0 V。在设置了必要的仿真条件后,开始进行初始模块的搭建,分别是阴极发射源,阴极凹槽,栅极,聚焦极,阳极¹⁹¹。具体参数表 1 所示。

(3) 设置电极材料

确定各个电极的材料参数: 仿真中各个组件的 材料均为 Perfect electronic conductor (PEC) 即完美 导体材料, 背景材料定义为真空。

(4) 发射源设置

设置阴极表面为发射面,并设定发射类型为场 致发射(Field-induced)。在理想条件下,场致发射模 型发射表面的电流密度由 F-N 公式给出,其中 E 为 电场的绝对值,J 为电流发射密度。根据实验拟合 得到数据: $a=4\times10^{-9}$ A/V², $b=2.18\times10^{7}$ V/m。

$$J = aEx^2 \exp(-b/E) \tag{1}$$

Tab. 1Initial structure parameters						
Name	Length of side/mm	Thickness/mm	Starting position	Outside diameter/mm	Inside diameter/mm	Voltage/V
Arc cathode	/	0.5	0	0.5	0	0
Cathode groove	/	0.8	0	1	0.5	0
Grid electrode	/	0.3	1.05	1	0.5	1000
Grid wire	/	0.1	/	/	/	1000
Grid hole	0.05	/	/	/	/	1000
Focusing electrode	/	0.3	1.7	1	0.4	0
Anode	/	0.5	2.6	1	0	90000

表1 初始结构参数

(5) 其他设置

在阴极发射源和电子束轨迹范围内进行网格加密,其他部分则自动划分网格,再将所有边界面上的边界条件都设定为 open,设置粒子跟踪求解器并开始进行仿真。

2 焦点及仿真

2.1 焦点的定义

X 射线管的焦点大小对成像质量有极大的影响,焦点越大分辨率就越低,成像质量就越差,因此 在设计中要尽可能地缩小焦点。有效焦点和实际 焦点统称为焦点,其中有效焦点是阳极靶面通过一 定的靶面倾角将 X 射线辐射出去的矩形块,实际焦 点就是电子束最终打到了在阳极靶面上的矩形块, 焦点尺寸则是矩形块的面积大小^[10],焦点示意图见 图 2。



2.2 阴极凹槽对仿真结果的影响

观察凹槽对阴极发射电子的具体影响时,保证 电子枪其他部件参数不变,在阴极加一个凹槽并且 不断改变凹槽的高度,对比仿真结果,不同凹槽高 度下的电子束轨迹如图 3 所示,不同凹槽高度下的 焦点尺寸图如图 4 所示。图 3(a) 是无凹槽时电子 束轨迹,图 4(a) 是无凹槽时的焦点尺寸,此时电子



- 图3 不同凹槽高度下的电子束轨迹。(a) 无凹槽时,(b) 凹槽 比 阴 极 表 面低 0.3 mm 时,(c) 凹 槽 比 阴 极 表 面 高 0.3 mm 时
- Fig. 3 Electron beam trajectories for different groove heights.(a) Without grooves, (b) when the groove is 0.3 mm lower than the cathode surface, (c) when the groove is 0.3 mm higher than the cathode surface



图4 不同凹槽高度下的焦点尺寸。(a)无凹槽时,(b)凹槽 比阴极表面低 0.3 mm时,(c)凹槽比阴极表面高 0.3 mm 时

Fig. 4 Focal point dimensions at different groove height. (a) Without grooves, (b) when the groove is 0.3 mm lower than the cathode surface, (c) when the groove is 0.3 mm higher than the cathode surface

通过率为 75.21%, 有效焦点尺寸为 500 μm; 图 3(b) 是凹槽低于阴极表面时电子轨迹, 图 4(b) 是凹槽低 于阴极表面时的焦点尺寸, 此时凹槽比阴极表面低 0.3 mm, 电子通过率为 80.33%, 有效焦点尺寸为 500 μm; 图 3(c) 是凹槽高于阴极表面时电子轨迹, 图 4(c) 是凹槽高于阴极表面时的焦点尺寸, 此时凹 槽比阴极表面高 0.3 mm,电子通过率为 90.26%, 有 效焦点尺寸为43 μm。在未加凹槽时可以观察到从 阴极发射出来的电子都在向四周散射,当所加凹槽 高于阴极表面之后电子束具有了良好的收敛性。 且加了一个高于阴极表面的凹槽后电子通过率从 75.21% 提高到 90.26%,且有效焦点尺寸也从 500 μm 降低到 50 μm 以内,这展示出了添加一个凹槽的 优势。

同时所加的凹槽高度对仿真结果也有着一定 的影响,这里所说的凹槽高度是比阴极高出的部分。 如图 5 所示是不同凹槽高度对应的仿真结果,图 5(a) 的折线图展示了凹槽高度对阴极电流的影响,凹槽 的高度依次递增,阴极发射电流在不断减小,这是 因为随着凹槽高度不断变大,会削弱碳纳米管的尖 端效应,阴极发射电流就会随之减小^[11]。图 5(b)的 折线图是凹槽高度对电子通过率的影响,观察到电 子通过率随着凹槽高度对焦点尺寸的影响,随着凹槽 高度的增加焦点尺寸会变小。综合阴极发射电流、 电子通过率与焦点尺寸考虑,本文最终选取的凹槽 高度为 0.2 mm。

2.3 栅极对仿真结果的影响

常见的栅极网孔有四边方形、圆形以及六边蜂 窝形等,其中六边形栅孔即蜂窝栅会使得电子通过 时分布更为均匀^[12],因此本文选择了阵列六边形蜂 窝栅孔,栅极结构如图6所示。仿真时在其它组件 参数不变的情况下,观察不同栅极电压和厚度对阴 极发射电流、电子通过率与焦点尺寸的影响。

随着栅极厚度的增大,电子束通过栅极的时间 会变长,栅极内壁也就更容易截获电子,不可避免 地导致了电子通过率和阴极电流的降低^[13],因为通 过的电子数目不断减小,所以电子束也就更容易被 聚焦极聚焦,阳极靶上得到的焦点尺寸也就会更小。 栅极厚度与电子通过率的变化趋势如图 7(a)所示, 栅极厚度对焦点尺寸影响如图 7(b)所示。根据仿 真结果,本文选取的栅极厚度为 0.3 mm。

根据场发射的机制, 阴极的电子要穿过材料表面的势垒就需要给栅极施加一定的电压将电子牵拉出来, 因此栅极电压不能过小^[14]。若栅极电压过大则会增加管子内各个组件之间的绝缘难度, 栅极电压特别大的时候可能还会烧毁阴极。基于以上种种原因, 本文研究栅极电压对仿真结果影响时, 选取栅极电压范围为 500~3000 V, 栅极电压对仿真



图5 凹槽高度对仿真结果的影响。(a) 凹槽高度对阴极电流 的影响,(b) 凹槽高度对电子通过率的影响,(c) 凹槽高 度对焦点尺寸的影响

Fig. 5 The influence of groove height on simulation results.(a) The influence of groove height on cathode current,(b) the influence of groove height on electron pass rate,(c) the influence of groove height on focal size

结果的影响如图 8 所示。图 8(a) 展现了栅极电压 对电子通过率的影响,随着栅极电压增加电子通过 率略有降低;图 8(b) 展现了栅极电压对焦点尺寸的 影响,随着栅极电压的增大,焦点尺寸也会变大;图 8(c) 展现了栅极电压对阴极发射电流的影响,可以观察



- 图7 栅极厚度对仿真结果的影响。(a) 栅极厚度对电子通过 率的影响,(b) 栅极厚度对焦点尺寸的影响
- Fig. 7 The influence of gate thickness on simulation results.(a) The influence of gate thickness on electron passing rate, (b) the influence of gate thickness on focus point

到阴极发射电流随着栅极电压的增大而增大。可 以看出,当栅极电压为1000V时得到的仿真结果最 理想。

2.4 聚焦极对仿真结果的影响

图 9(a) 为聚焦极电压与仿真结果的关系,可以 看到, 给聚焦极施加的电压不断增大时, 焦点尺寸



- 图8 栅压对仿真结果的影响。(a) 栅极电压对电子通过率的 影响,(b) 栅极电压对焦点尺寸的影响,(c) 栅极电压对 阴极发射电流的影响
- Fig. 8 The influence of grid voltage on simulation results.(a) The influence of gate voltage on electron pass rate,(b) the influence of grid voltage on focal size, (c) the influence of gate voltage on cathode emission current

先减小后增大,在聚焦极电压为0V时,有效焦点尺 寸最小。聚焦极的电压越大,打到其内壁上的电子 也就越多,这就使得聚焦效果有所降低,焦点尺寸 也就随着变大。但是若一味地降低聚焦极电压就 会使得电子返回打到栅极上,电子束轨迹如图 9(b) 所示。根据实验结果,本文选取的聚焦极电压为 0V。

在聚焦极电压与厚度都不变的前提下,仅修改 聚焦极孔的半径,焦点尺寸变化如图 10(a)所示,可 以看出焦点尺寸随着聚焦极孔径的增大先减小后



- 图9 聚焦极电压对仿真结果的影响。(a)聚焦电极电压对焦 点尺寸的影响,(b)聚焦电极电压过低时的电子轨迹
- Fig. 9 The influence of focusing electrode voltage on simulation results. (a) The influence of focusing electrode voltage on focus size, (b) electron trajectory when the focus electrode voltage is too low

增大,其中聚焦极电压始终为0V,聚焦极厚始终为0.3 mm。接着保持聚焦极孔径的半径为0.4 mm不变,仅改变聚焦极的厚度,焦点尺寸变化如图10(b)所示,焦点尺寸随着聚焦极电压的增大先减小后增大。改变聚焦极的参数会使焦点尺寸产生较大的变化,这说明不同的管子组件参数对应的最佳聚焦极的参数是不一样的,需要通过建模仿真才能得到最适合的聚焦极参数。综合仿真结果,本文选取的聚焦极孔径为0.4 mm,聚焦极厚度为0.3 mm。

2.5 阳极对仿真结果的影响

仅调节阳极电压,记录下阳极电压由 50 kV 增加到 150 kV 过程中阴极电流、电子通过率和有效 焦点尺寸的变化,绘制出图像如图 11 所示。图 11(a) 是阳极电压对电子通过率的影响,电子通过率随着 阳极电压的增大而线性增加。图 11(b)是阳极电压 对焦点尺寸的影响,随着阳极电压的增大,焦点尺 寸会先减小后增大,这是由于电子束聚集的最小横 截面会随着阳极电压的增大而往阳极靶面移动,所



图10 聚焦极孔径和厚度对焦点的影响。(a)聚焦极孔径对 焦点尺寸的影响,(b)聚焦极厚度对焦点尺寸的影响

Fig. 10 The influence of aperture and thickness of focusing pole on focus. (a) The influence of focusing pole aperture on focus, (b) the influence of focusing pole thickness on focus

以阳极电压变大会导致焦点尺寸变小。若阳极电 压加的过于大,电子束聚集的最小横截面会向阳极 靶面后方移动,打在阳极靶面上的焦点尺寸也会变 大,同时还可能会导致出现击穿、放电的现象^[15]。 图 11(c) 是阳极电压对阴极发射电流的影响,阴极 发射电流也是随着阳极电压的增大而增大。综合 仿真结果,阳极电压不宜过大,本文最终采取的阳 极电压为 90 kV。

综合以上的模拟仿真, 调节各个电极参数, 最 终得到的最佳仿真结果如图 12 所示。图 12(a) 是最 终得到的电子束轨迹图, 此时电子束具有良好的收 敛性; 图 12(b) 是此时的阴极发射电流; 图 12(c) 是 此时打在阳极靶面上的焦点形状, 最终得到的有效 焦点尺寸约为 45 μm, 电子通过率为 95.41%。此外, 本次仿真电子束到达阳极的动能为 90 keV, 能够满 足实验室钨靶产生 X 射线的要求。



图11 阳极电压对仿真结果的影响。(a) 阳极电压对电子通 过率的影响,(b) 阳极电压对焦点的影响,(c) 阳极电压 对阴极发射电流的影响

Fig. 11 The influence of anode voltage on simulation results.(a) The influence of anode voltage on electron pass rate, (b) the influence of anode voltage on focal point,(c) the influence of anode voltage on cathode emission current

3 结论

本文利用 CST 粒子工作室软件建立了一种电 子枪的模型并对其各个基本组件的电压及尺寸等 参数进行仿真分析,发现阴极凹槽高度、栅极及聚 焦极结构尺寸等对仿真结果都有着一定的影响。 主要结论如下:



图12 仿真结果图。(a) 电子束轨迹, (b) 阴极发射电流, (c) 焦 点图

Fig. 12 Simulation results. (a) Electron beam locus, (b) cathode emission current, (c) focal size diagram

(1) 不加凹槽或者凹槽高度不够都会导致电子 发散长度过大, 凹槽高度过大就会导致阴极发射电 流过小, 最终选取的凹槽高度为 0.2 mm。栅极电压 越小, 最终的焦点尺寸就会越小, 而栅压太小将无 法导出阴极电子, 太大则可能会烧毁阴极组件, 本 文最终选取的栅极电压为 1000 V。

(2)通过改变聚焦极的尺寸和电压,最终通过 仿真确定了聚焦极高度为 0.3 mm,聚焦极孔径为 0.4 mm。综合仿真结果,阳极电压不宜过大,本文 最终采取的阳极电压为90 kV。

(3)本文设计了一种冷阴极电子枪,最终得到的 有效焦点尺寸约为 45 μm,电子通过率为 95.41%。 同时电子束到达阳极的动能为 90 keV,能够满足实 验室钨靶产生 X 射线的要求。

参考文献

- [1] Xu X T, Yuan X S, Chen Q Y, et al. A low-voltage, premodulation terahertz oscillator based on a carbon nanotube cold cathode [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020: 1266–1269
- [2] Wu L. Research on electron optics design of carbon nanotube cold cathode electron gun[D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 2-5 (吴量. 碳纳米管冷阴极电子枪电 子光学设计研究 [D]. 南京:东南大学, 2020: 2-5(in Chinese))
- [3] Li X H, Hu Y F, Cai J, et al. Preliminary study of field emission cathode microfocus X-ray tube[J]. Vacuum Electronics Technology, 2016(01): 5-6+10 (李兴辉, 胡 银富, 蔡军, 等. 场发射阴极微焦点 X 射线管初步研究 [J]. 真空电子技术, 2016(01): 5-6+10(in Chinese))
- [4] Zhu W, Lu Q X, Qian W J, et al. Study on a new type of microfocus electron source for carbon nanotubes[J]. Vacuum, 2022, 59(1): 48-53 (祝维, 陆群旭, 钱维金, 等. 新型碳纳米管微焦点电子源研究 [J]. 真空, 2022, 59(1): 48-53(in Chinese))
- [5] Shi X Q, Liu J H, Chen X Y, et al. Physical design of high performance electron gun[J]. Vacuum, 2023, 60(03): 62-66 (石晓倩, 刘佳辉, 陈雪颖, 等. 高性能电子枪的物 理设计 [J]. 真空, 2023, 60(03): 62-66 (in Chinese))
- [6] Zhang Y, Li Z J, Li Y X, et al. Design and simulation of key components of cold cathode X-ray tube[J]. Vacuum electronics technology, 2022, 359(004): 000 (张扬, 李振 军, 李元勋, 等. 冷阴极 X 射线管关键部件的设计与仿 真 [J]. 真空电子技术, 2022, 359(004): 000(in Chinese))
- Gharaati A , Mardani D. Electrostatic design and fabrication a new tunable perveance pierce electron gun[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(1): 318–323
- [8] Lee H R, Kim D W, Hwang O J, et al. Scanning electron imaging with vertically aligned carbon nanotube (CNT) based cold cathode electron beam (C-beam)[J/OL]. Vacuum, 2020, 182: 109696
- [9] Zhao S, Yang Y, Shen Y, et al. Optics metrology and atwavelength wavefront characterization by a microfocus Xray grating interferometer. [J/OL]. Optics Express, 2021, 29(14): 22704

- [10] Wang X J, Zha L H, Qi K C, et al. Simulation experiment of electron gun emitted by microfocus field based on Opera[J]. Experimental technology and Management, 2019, 36(12): 98-101+106 (王小菊, 查林宏, 祁康成, 等. 基于 Opera 的微焦点场发射电子枪仿真实验 [J]. 实 验技术与管理, 2019, 36(12): 98-101+106(in Chinese))
- [11] Polishchuk V , Usmanov R , Melnikov A, et al. On the stability of diffuse attachment on the hot cathode of vacuum arc[J]. High Temperature Material Processes An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, 2023, 27(3): 43–49
- [12] Li Y B, Li X L, Jiang Y M. Micro-focus X-ray CT and its application in non-destructive testing[J]. Non-destructive Testing, 1999, 21(12): 4 (李玉彬, 李向良, 姜燕梅. 微焦 点 X 射线 CT 及其在无损检测中的应用 [J]. 无损检测, 1999, 21(12): 4(in Chinese))
- [13] Yao W J, Liu S L, Yan B J, et al. Development of a cold cathode electron source based on gold cathode MCP[J]. Chinese Journal of Mass Spectrometry, 2023, 44(1): 9 (姚文静, 刘术林, 闫保军, 等. 一种基于金阴极 MCP 的 冷阴极电子源的研制 [J]. 质谱学报, 2023, 44(1): 9(in Chinese))
- [14] Xiao H C, Feng Y B, Wang J G. Research progress of carbon nitride in field emission of cold cathode materials[J]. Materials Engineering, 2022, 50(6): 75-85 (肖浩春, 丰义兵, 王继刚. 氮化碳在场发射冷阴极材料中的研究进展 [J]. 材料工程, 2022, 50(6): 75-85(in Chinese))
- [15] Jousten K, Boineau F, Bundaleski N, et al. A review on hot cathode ionisation gauges with focus on a suitable design for measurement accuracy and stability[J]. Vacuum, 2020, 179: 109545