一种双聚焦极双栅电子枪的设计

刘志霞!俞道龙!王贺飞2 万知之2* 徐季!*

(1. 南京信息工程大学天长研究院 电子与信息工程学院 南京 210000; 2. 北京真空电子技术研究所 北京 100015)

Design of a Double Focusing Pole Double Grid Electron Gun

LIU Zhixia¹, YU Daolong¹, WANG Hefei², WAN Zhizhi^{2*}, XU Ji^{1*}

(1. School of electronics and information engineering, Nanjing University of Information Science and Technology Tianchang Research Institute, Nanjing 210000, China; 2. Beijing Institute of Vacuum Electronics Technology, Beijing 100015, China)

Abstract This article mainly designs a field emission cold cathode electron gun using a hexagonal pyramid embedded cylindrical cathode structure. The anode current and focal size of the electron gun are simulated using Computer Simulation Technology particle studio software, and the structure of the electron gun is continuously optimized. Finally, a dual focusing electrode dual grid electron gun with an effective focal size of about 20 μ m, anode current of 3.8 mA, and electron pass rate of 84.5% is designed. In addition, simulation results showed that in the dual-focusing electrode structure electron gun, the V_{fl}/V_{f2} at which the electron gun obtains the minimum focal size decreases with increasing V_{f2} . At the same time, the anode current increases with increasing V_{fl}/V_{f2} , and this increase significantly expands with increasing V_{f2} . These findings provide important guidance for further optimizing the performance of the electron gun.

Keywords Dual focusing electrode, Dual grid electrode, Cold cathode, Carbon nanotubes, Field emission

摘要 文章主要设计了一种使用六棱锥内嵌圆柱体阴极结构的场发射冷阴极电子枪,通过 Computer Simulation Technology 粒子工作室软件对该电子枪的阳极电流和焦点尺寸进行仿真模拟,进而不断优化该电子枪的结构,最终设计出一款有效焦点尺寸约为 20 μm,阳极电流为 3.8 mA,电子通过率达到了 84.5% 的双聚焦极双栅电子枪。此外,通过仿真结果发现,在双聚焦极结构电子枪中,电子枪获得最小焦点尺寸的 V_ρ/V_ρ会随着 V_ρ增加而减小,同时,阳极电流会随着 V_ρ/V_ρ的增加而增加,并且这一增幅会随着 V_ρ增加而显著扩大,这些发现为进一步优化电子枪的性能提供了重要的指导信息。

关键词 双聚焦极 双栅极 冷阴极 碳纳米管 场发射 中图分类号: TN24 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202409006

自 20 世纪真空电子器件问世以来,凭借其高效率、高功率和抗辐射等优异特性,真空电子器件 在航空航天、国防、射频及太赫兹等领域发挥了至 关重要的作用^[1]。真空电子器件具备出色的载流子 传输机制——通过外部真空封装,电子能够在真空 中实现无散射的弹道传输。这一特性使得真空电 子器件在 X 射线源、电子枪和高分辨率电子显微镜 等领域具备不可替代的优势。目前,绝大多数真空 电子器件依赖热电子发射,通常需要外部加热源辅 助电子发射,以实现更高的发射电流密度和稳定性能。然而,这类基于热场发射的真空器件也存在温度高、功耗大、响应迟缓等不足,尤其是在X射线源和电子枪的应用中,往往需要一定时间的预热,严重影响了设备的工作效率^[2]。此外,热场发射真空器件通常需要额外的结构和设备来辅助散热,这在一定程度上限制了其进一步微型化的发展。为了克服这些局限性,冷场发射技术逐渐引起了广泛关注。与传统的热场发射不同,冷场发射依赖强电

场下的量子隧穿效应,无需加热即可实现电子的高效发射。由于不依赖外部加热源,冷场发射器件具 有低功耗、快速响应等优势^[3],这使得它在高精度成 像、超快电子束源以及其他先进电子器件领域展现 出了巨大的潜力。冷场发射的引入为真空电子器 件的发展开辟了新的方向,进一步推动了其在现代 技术中的应用和创新。

2016年,杜小飞^[4]进行了关于栅网结构电子枪 原型的研究,探讨了不同栅网通过率对阴极发射电 流和阳极电流的影响,发现当栅网通过率设定为约 80%时,可以实现阳极电流的最大值。2022年,Li J等^[5]报道了凸面碳纳米管发射极可以改善电子束 在枪内的发射均匀性和聚焦特性,发现与平面碳纳 米管发射极相比,凸型发射极表面的发射点分布均 匀,极大地消除了边缘效应。同年,Chen O 等^[6]利 用双栅电子枪实现电子通过率接近 100%, 姜芮芮^[7] 建立了对平面单栅冷阴极电子枪和平面双栅冷阴 极电子枪的仿真模拟研究,发现平面双栅冷阴极电 子枪在电子通过率等性能方面优于平面单栅冷阴 极电子枪。在以往的研究中,大部分学者将目光聚 焦在阴极和栅极结构上,而本文则是将主要目光放 在聚焦极上,通过各种仿真分析聚焦极对电子枪性 能的影响。

1 仿真模型的建立

近年来,得益于发射材料和结构的兴起,基于 场发射原理的冷阴极电子枪得到了蓬勃发展,如碳 纳米管(CNT)^[8-9]、石墨烯^[10]、钼 FEA^[11]、硅尖端阵 列^[12]等,其中 CNTs冷阴极由于其加工简便、制备 成本低、启动场强低、稳定性高、发射电流密度大 以及使用寿命长等优势,受到了广泛关注,并被认 为是理想的场发射冷阴极材料^[13]。本文中使用的电 子发射模型基于碳纳米管场致发射机制,在电子光 学仿真软件 CST 中,粒子源模型选择了场发射模型, 其发射电流密度符合经典的 Fowler-Nordheim 公式, 对应的表达式为:

$$J = \mathbf{A} \frac{(\beta E)^2}{\phi} \exp\left[\left(-\mathbf{B} \frac{\phi^{3/2}}{\beta E}\right)\right]$$
(1)

在式(1)中,常数 A=1.54×10⁻⁶、B=6.83×10⁻⁹, *J* 代表发射电流密度, *E* 为阴极表面电场强度, β 表示 场致发射材料场增强因子, ϕ 是发射材料的功函数, 对式(1)的两边取对数处理后,得到相应的表达式:

$$\ln(J/E^2) = \ln(a - b/E)$$
 (2)

在式(2)中, $a = A(\beta^2/\phi)$ 为场致发射的线性因子, $b = B(\phi^{3/2}/\beta)$ 为场致发射的指数因子,这些因子的具体值依赖于阴极材料的功函数和场增强因子的特性。a, b的值可以通过实验测得^[14-16],本文是为了探索结构参数对电子枪的各项性能指标的影响,因此这里的a, b的值选取课题组前期工作测得的拟合结果。

本文设计的单聚焦极双栅电子枪的具体参数 如表1所示。在确定了发射模型的基本参数后,构 建了如图1所示的单聚焦极双栅电子枪模型。图1(a) 展示了单聚焦极双栅电子枪的整体结构,由阴极、 栅极、聚焦极和阳极四个基本部件构成。其中阴极 作为电子的来源,对电子枪的性能有着至关重要的 影响,将如图1(b)所示的底边长为0.17mm、侧棱 长为 0.2 mm 的六棱锥内嵌圆柱体作为阴极结构,通 过曲面阴极的特殊形状,对电子束流起到了预聚焦 的作用。在电子枪的栅网结构中,蜂窝栅因其较高 的透过率而被广泛应用。因此, 选择了栅孔边长为 0.15 mm、 栅 丝 宽 度 为 0.01 mm 的 蜂 窝 栅 作 为 电 子枪的第一栅极,它的具体结构如图1(c)所示。 图 1(d)展示了电子枪的第二栅极,采用了栅孔边长 为 0.1 mm、 栅 丝 宽 度 为 0.01 mm 的 蜂 窝 栅 。 图 1(e) 展示了电子枪的聚焦极结构,是一个内、外半径分 别是 0.3 mm 和 0.5 mm、高度为 0.4 mm 的圆柱体。

表1 单聚焦极双栅电子枪的具体参数

Tab. 1 Basic parameters of single focusing electrode double grid electron gun

					-
	name	starting	outside	inside	voltage/
		position/mm	diameter/mm	diameter/mm	kV
	cathode	0	0.2	/	0
	first grid	0.1	0.5	/	1.5
	second grid	0.5	0.5	/	1.5
	focus	1	0.5	0.3	0.3
	anode	1.5	0.5	/	50

冷阴极电子枪作为现代电子显微镜、粒子加速 器及其他精密电子设备中的关键组件,其性能直接 影响到系统的工作精度和效率。在设计电子枪时, 阳极电流和焦点尺寸是影响电子枪成像质量的关 键因素,它们的优化是实现高质量电子束的前提。 阳极电流通常决定电子束的强度,而焦点尺寸则是 衡量电子束聚焦质量的标准,直接影响到束流的空





Fig. 1 Single focusing electrode double grid electron gun. (a) Structure diagram of electron gun, (b) diagram of cathode, (c) diagram of the first gate, (d) diagram of the second gate, (e) diagram of focusing electrode

间分布和集聚能力。电子枪的设计目标是实现精 确聚焦与稳定的电子束输出。随着阳极电压的提 高,电子束的加速能力增强,电子的动能增大,这通 常会导致焦点尺寸的变化,因为电子能量的提升会 影响电子束的发散角度,而阳极电流的增大则意味 着电子束中携带的电子数增加,这可能使焦点尺寸 扩大,进而影响系统的分辨率和束流稳定性。因此, 本文将重点探讨电子枪设计中阳极电压与阳极电 流和焦点尺寸的关系,进一步分析这些参数变化对 电子枪性能的优化作用,从而为电子枪的设计与应 用提供理论依据和技术参考。

2 仿真结果及分析

2.1 单聚焦极双栅电子枪

在电子枪的设计中,栅极对电子发射行为起着 至关重要的调控作用,尤其在调节电子发射速度方 面。具体而言, 栅极电压的变化会影响阴极发射电 子的加速过程, 从而决定阳极电流的大小。作者研 究了设计的单聚焦极双栅电子枪中栅极电压与阳 极电流之间的关系, 并得到了如图 2 所示的曲线。 从中可以观察到, 阳极电流随着栅极电压的增大呈 现出显著的指数增长趋势, 该现象与经典的 Fowler-Nordheim 方程一致。电子从阴极表面发射的电流 与栅极电压呈指数依赖关系, 栅极电压的升高会导 致隧穿效应增强, 从而显著增加发射的电子数目, 导致阳极电流的指数型增长。通过图 2, 能够验证 设计的单聚焦极双栅电子枪的栅极电压与阳极电 流之间的指数关系, 并进一步支持 Fowler-Nordheim 模型的适用性。这一结果对于电子枪的设计和优 化具有重要的参考价值, 尤其在控制电子束的发射 特性和提高设备性能方面。

图 3(a)和图 3(b)显示了单聚焦极双栅电子







枪在不同阳极电压下的电学特性仿真结果。其中 图 3(a)显示了不同阳极电压下的阳极电流变化,随 着阳极电压的增加,电子枪的阳极电流逐步增加, 特别是在阳极电压为0至5kV范围内,阳极电流急 剧上升;而当阳极电压达到5kV后,其增长速度明 显减缓。图 3(b)则展示了焦点尺寸的变化,电子枪 的焦点尺寸随着阳极电压的增加而增大,在阳极电 压达到 5 kV 后,焦点尺寸逐渐变小。

可以观察到,当阳极电压为0V时,阳极内部仍 然存在电流流动,且电子在阳极表面汇聚形成焦点。 这是因为栅极和聚焦极施加的电压在电子枪系统 中产生了空间电场,该电场不仅影响电子的发射过 程,还决定了电子束的加速与聚焦。在低电压下, 电场强度不足,导致电子束无法获得足够的动能和 速度,难以克服阳极电场的阻力,导致电子在阴极 周围积聚,形成电子堆积区域,无法形成稳定的电 子束流。同时,电子束的速度较慢,缺乏足够的聚 焦力,束流过早发散,焦点无法集中,甚至无法形成 清晰的焦点。随着阳极电压逐渐增加,电子束的动 能逐步增大,电子能够克服电场阻力,从阴极表面 被发射到阳极,形成阳极电流。当阳极电压达到一 定临界值时,阳极电流急剧增加,电子束加速作用 显著,推动更多电子通过阳极,从而产生强烈的电流。

电子枪的聚焦系统通常依赖于适当的电场来 控制电子束的聚焦效果,如果电压过低,聚焦系统



图3 电子枪的电学特性仿真结果。(a)单聚焦极双栅电子枪阳极电压与阳极电流的关系,(b)单聚焦极双栅电子枪阳极电压与 焦点尺寸的关系,(c)双聚焦极双栅电子枪阳极电压与阳极电流的关系,(d)双聚焦极双栅电子枪阳极电压与焦点尺寸的关 系,(e)优化的双聚焦极双栅电子枪阳极电压与阳极电流的关系,(f)优化的双聚焦极双栅电子枪阳极电压与焦点尺寸的关系



的效果可能会变差或失效,使得无法将电子束有效 地聚焦到预期的焦点位置。根据上述结果,对电子 枪设置一定的电压偏置,也即:设置阳极电压为 50 kV、第一栅极和第二栅极的电压都为 1.5 kV、聚 焦极电压为 300 V,仿真结果如图 4(a)所示。 图 4(a)展示了单聚焦极双栅电子枪的电子束流轨 迹和焦点情况,可以看出该电子枪的有效焦点尺寸 约为 53 μm,电子通过率约为 89.1%。

2.2 双聚焦极双栅电子枪

在碳纳米管冷阴极电子枪中,聚焦极的作用是 通过电场或磁场对电子束进行聚焦,使其在特定的 焦点处形成清晰的成像或投射。双聚焦极相比单 聚焦极的优势在于可以更精确地控制电子束的聚 焦效果,从而提高成像分辨率和精度。双聚焦极系 统通常包括一个主聚焦极和一个辅助聚焦极,可以 通过不同的设置和调节使电子束更精确地聚焦在 所需的位置。鉴于单聚焦极双栅电子枪在聚焦效 果上已取得较为理想的成果,但仍未能完全满足电 子显微镜、电子束焊接、粒子加速器等高精度仪器 的严格要求,进一步提升电子枪性能的需求依然存 在。因此,为了探索多聚焦结构对电子枪性能的潜 在改善作用,设计了一种采用双聚焦极结构的新型 冷阴极电子枪,希望通过优化电子束的聚焦效果, 进而提升电子枪的束流质量和空间分辨率,从而满 足更高精度仪器的应用需求。

图 5(a)展示了该双聚焦极双栅电子枪的结构, 依据图 1(a)的单聚焦极双栅电子枪的仿真结构,在 其距离阴极 1.7 mm 处添加了如图 5(b)所示的开孔 半径为 0.3 mm 的第二聚焦极,设计了一个双聚焦极 双栅电子枪,并将其与单聚焦极双栅电子枪进行性



图4 电子枪仿真结果。(a)单聚焦极双栅电子枪的束流轨迹和焦点,(b)双聚焦极双栅电子枪的束流轨迹和焦点,(c)优化的双 聚焦极双栅电子枪的束流轨迹和焦点

Fig. 4 Simulation results of electron gun. (a) The beam trajectory and focus point of a single focusing pole double grid electron gun, (b) the beam trajectory and focus point of a dual focusing electrode dual grid electron gun, (c) the beam trajectory and focus point of an optimized dual focusing pole dual grid electron gun



图5 双聚焦极双栅电子枪。(a)电子枪结构图,(b)第二聚焦极图

Fig. 5 Dual focusing electrode dual grid electron gun. (a) Structure diagram of electron gun, (b) diagram of the second focusing electrode

能比较,随后进行深入研究。

2.2.1 不同阳极电压下的仿真结果

为了比较双聚焦极双栅电子枪与单聚焦极双 栅电子枪的性能,作者按照单聚焦极双栅电子枪的 仿真分析流程,对双聚焦极双栅电子枪进行了相同 的模拟仿真,得到了如图 3(c)和图 3(d)所示的双聚 焦极双栅电子枪在不同阳极电压下的电学特性仿 真结果,涵盖了阳极电流和焦点尺寸的变化情况。 其中图 3(c)显示随着阳极电压的增加,电子枪的阳 极电流逐步增加,特别是在阳极电压为0至5kV范 围内,阳极电流急剧上升;而当阳极电压达到 5kV后,其增长速度明显减缓。图 3(d)则展示了不 同阳极电压时焦点尺寸逐渐增大,在阳极电压达到 5kV后,焦点尺寸逐渐变小,而当阳极电压达到 50kV后,焦点尺寸逐渐变小,而当阳极电压达到

从图表分析可以看出,双聚焦极双栅电子枪与 单聚焦极双栅电子枪相似,在阳极电压为0V时,由 于栅极与聚焦极之间的电压差,阳极内部仍存在电 流,因此电子束可以在阳极表面聚束并形成焦点。 进一步观察发现,与单聚焦极双栅电子枪一样,双 聚焦极双栅电子枪的阳极电流随阳极电压的增加 呈现先急剧上升后逐渐趋缓的趋势。然而,与单聚 焦极电子枪不同的是,双聚焦极双栅电子枪在阳极 电流增加过程中,焦点尺寸会出现最小值。这样可 以通过精确控制阳极电压,使焦点尺寸达到最小值, 可以实现最佳的聚焦效果,从而提高成像分辨率、 增强电子束的稳定性和集束性,同时可以为不同应 用提供灵活的调节选项。这些优化可以大大提升 电子枪在高精度成像和高功率应用中的表现。 2.2.2 双聚焦结构电压对器件性能的影响

定义应用在第一聚焦极上的电压为 V_{n} ,第二聚 焦极上的电压为 V_{2} ,首先,对双聚焦极双栅电子枪 的第二聚焦极分别施加 30 V、60 V 和 90 V 的电压, 然后通过调整第一聚焦极的电压来获得不同聚焦 极电压比值,即 V_{n}/V_{2} 。

图 6 展示了不同 V_{n}/V_{ρ} 下双聚焦极双栅电子 枪的仿真结果,包括焦点尺寸和阳极电流的变化。 图 6(a)显示了在不同 V_{n}/V_{ρ} 下的焦点尺寸变化情况, 随着 V_{n}/V_{ρ} 的增加,焦点的尺寸先减小到达最小值, 然后再随着 V_{n}/V_{ρ} 的继续增加而增大。在 V_{ρ} 为 30 V, V_{n}/V_{ρ} 为 10 时,焦点尺寸约为 23 μ m;在 V_{ρ} 为 60 V, V_{n}/V_{p} 为 9 时, 焦点尺寸约为 $24 \mu\text{m}$; 在 V_{p} 为 90 V, V_{n}/V_{p} 为 5 时, 焦点尺寸也约为 $24 \mu\text{m}$, 随着 V_{p} 的增大, 出现最小焦点尺寸的 V_{n}/V_{p} 在减小。由此我们可以推断出, 随着 V_{p} 的增加, 获得最小焦点尺寸的 V_{n}/V_{p} 会减小。图 6(b)展示了不同 V_{n}/V_{p} 时阳极电流的变化趋势, 可以看到随着 V_{n}/V_{p} 的增加, 阳极电流也在增加, 且增幅随着 V_{p} 的增加而增大。



- 图6 双聚焦极双栅电子枪不同 V_n/V_p 值下的仿真结果。(a) V_n/V_p 值与焦点的关系, (b)V_n/V_p 值与阳极电流的关系
- Fig. 6 Simulation results of dual focusing electrode dual grid electron gun with different V_{fl}/V_{f2} values. (a) The relationship between V_{fl}/V_{f2} values and focus point, (b) the relationship between V_{fl}/V_{f2} values and anode current

通过对上述结果的讨论,为了进一步分析,本 文对双聚焦极双栅电子枪设置一定的电压偏置,即 设置阳极电压为 50 kV、第一栅极和第二栅极的电 压都为 500 V、V_Λ 为 300 V、V_Δ 为 30 V,得到的仿真 结果如图 4(b)所示。图 4(b)展示了双聚焦极双栅 电子枪的电子束流轨迹和焦点情况。该电子枪的 有效焦点尺寸约为 23 μm,电子通过率约为 72.8%。 然而,也观察到一些电子仍然发散到了边缘位置。 为了更进一步提高其性能和焦点精度们对该电子 枪进行了进一步优化。

2.2.3 优化双聚焦极双栅电子枪

保持第一栅极的位置不变,改变其厚度进行仿

真。如图 7 所示,随着栅极厚度的增加,阳极电流逐 渐减小。阳极电流的大小直接影响成像的清晰度 和分辨率,较大的阳极电流能提供更多电子,增强 成像的对比度,有助于更精确地观察样本结构。基 于这些考虑,设计了优化后的双聚焦极双栅电子枪, 如图 8 所示。图 8(a)展示了优化后的结构,与之前 的设计相比,第一栅极的厚度减少至 5 μm,如图 8(b)。图 8(c)则展示了第二栅极的结构,其厚度同 样调整为 5 μm,并在外部嵌入一个开孔半径为 0.3 mm、厚度为 0.2 mm 的圆柱体。

随后对该电子枪进行仿真,得到了如图 3(e)和 图 3(f)所示的不同阳极电压下优化双聚焦极双栅 电子枪的电学特性仿真结果,包括阳极电流和焦点 尺寸。如图 3(e)所示,随着阳极电压的增加,电子 枪的阳极电流逐步增加,特别是在阳极电压为0至 10 kV 范围内,阳极电流急剧上升;而当阳极电压达 到 10 kV后,其增长速度明显减缓。图 3(f)展示了 不同阳极电压时焦点尺寸的变化,随着阳极电压的







增加,电子枪的焦点尺寸逐渐增大,在阳极电压达 到5kV后,焦点尺寸逐渐变小,而当阳极电压达到 50kV后,焦点尺寸又开始逐渐增大。根据图3中 的电子枪电学特性仿真结果,可以观察到,设计的 电子枪的阳极电流随阳极电压的变化趋势大致相 同。在低阳极电压时,电子束的加速效应较为显著,



图8 优化双聚焦极双栅电子枪。(a)电子枪结构,(b)第一栅极图,(c)第二栅极图

Fig. 8 Optimize the dual focusing electrode dual grid electron gun. (a) Structural diagram of electron gun, (b) diagram of the first gate, (c) diagram of the second gate

阳极电流迅速增加;然而,随着电压进一步增高,电 流的增加逐渐受到电子束空间充填效应和加速电 场饱和的限制,导致电流的增长趋于平稳。这一现 象表明,在电子枪的实际应用中,合理控制阳极电 压至一个合适的范围是优化电子枪性能的关键因 素。此外,仿真结果还表明,在较低的阳极电压下, 由于电子束的聚焦效应较弱,焦点尺寸较大;而随 着电压升高,电子束的聚焦逐渐增强,焦点尺寸减 小。然而,当电压继续增高时,束流的发散效应可 能导致焦点尺寸再次增大。这一规律在实际应用 中具有重要意义,尤其是在高分辨率成像、电子束 加工和微型加速器等领域。通过优化焦点尺寸与 阳极电压的关系,可以有效提高系统的性能与精度, 从而更好地满足不同应用场景的需求。

同样为了进一步分析,作者对优化后的双聚焦极双栅电子枪设置相同的电压偏置,即设置阳极电压为 50 kV、第一栅极和第二栅极的电压为 1500 V、 V_{Λ} 为 300 V、 V_{ρ} 为 30 V,得到的仿真结果如图 4(c)所示。图 4(c)展示了优化后的双聚焦极双栅电子枪的电子束流轨迹和焦点情况。该电子枪的有效 焦点尺寸约为 20 μ m,电子通过率约为 84.5%

将上述单聚焦极双栅电子枪、双聚焦极双栅电 子枪和优化后的双聚焦极双栅电子枪的仿真结果 绘制成表 2。依据表 2 得到的数据显示优化后的双 聚焦极双栅电子枪在同样的仿真环境下表现最优: 有效焦点尺寸最小,阳极电流最大,并且电子通过 率达到了 84.5%。相较于单聚焦极双栅电子枪,优 化双聚焦双栅电子枪的有效焦点尺寸得到了大幅 度的聚焦效果,阳极电流也得到了提升,只是电子 通过率稍稍降低了一点,这些观察结果反映了双栅 结构的优势和劣势:尽管它能够提供更好的电子束 控制和焦点调节能力,但由于结构复杂性增加以及 可能导致的电子散射和损失,电子通过率相对于单 栅电子枪有所下降。因此,设计电子枪时需权衡这 些因素,以达到最佳性能和效率。

表 2 三种电子枪的仿真数据

Tab. 2 Simulation data of three types of electron guns

name	current/mA	focus point size/µm	electronic pass rate/%
single focus	2.3	53	89.1
dual focus	1.5	23	72.8
optimized	3.8	20	84.5

3 结论

本文通过使用 Computer Simulation Technology 粒子工作室软件仿真模拟,优化结构,最终设计出 一款场发射冷阴极电子枪,得到的主要结论如下:

首先,双聚焦极双栅电子枪获得最小焦点尺寸 的 V_n/V_n 会随着 V_n 增加而减小。相反,阳极电流会 随着 V₀/V₂ 的增加而增加,并且增幅会随着 V₂增加 而增大;其次,双聚焦极双栅电子枪的阳极电流会 随着第一栅极的厚度的增大而减小:最后,通过研 究不同阳极电压值下设计的不同结构电子枪的焦 点尺寸和阳极电流,并在确保其他仿真条件相同的 情况下比较它们的仿真结果,最终成功设计出了一 种双聚焦极双栅电子枪。这种电子枪的有效焦点 尺寸约为 20 um, 阳极电流为 3.8 mA, 电子通过率达 到了 84.5%。与以往的单聚焦极双栅电子枪相比, 它表现出更显著的焦点聚焦效果,并具备更大的阳 极电流,这对于保护设备寿命和确保试验稳定性至 关重要。本文通过对三种电子枪性能的比较和不 断的优化,最终确定了双聚焦极双栅电子枪的设计 方案。

虽然本文最终设计的双聚焦极双栅电子枪在 电子通过率上相较于单聚焦极双栅电子枪并没有 非常突出的优势,但在今后的电子枪研究中,双聚 焦极系统可以通过调节两个独立的聚焦极,从而实 现更高精度和更广泛的聚束控制,提高电子束的成 像分辨率和精度。而这种精确控制对于需要高分 辨率成像或精细加工的应用尤为重要,例如电子显 微镜、光刻设备等。其次,双栅结构不仅可以进一 步优化电子束的发射效率和稳定性,还能够降低电 子枪的能耗,延长设备的使用寿命,减少维护成本, 相信在未来的电子枪发展中,双聚焦极电子枪会占 据越来越重要的地位。

参考文献

- Parker K R, Abrams H R, Danly G B, et al. Vacuum electronics[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 835–845
- [2] Li X Q. Research on array carbon nanotube cold cathode electron gun[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016 (李禧强. 阵列式碳 纳米管冷阴极电子枪的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016 (in Chinese))
- [3] Xu X T, Yuan X S, Chen Q Y, et al. A low-voltage pre-

modulation terahertz oscillator based on a carbon nanotube cold cathode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(3): 1266–1269

- [4] Du X F. Design and application research of cold cathode electron gun[D]. Nanjing: Southeast University, 2017 (杜 小飞. 冷阴极电子枪的设计及应用研究 [D]. 南京: 东南 大学, 2017 (in Chinese))
- [5] Li J, Zhang Y, Ke Y, et al. A cold cathode electron gun using convex carbon nanotube emitter[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(3): 1457–1460
- [6] Chen Q, Yuan X, Xu X, et al. Development of a highbeam-transparency gridded electron gun based on a carbon nanotube cold cathode[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(4): 615–618
- [7] Jiang R R. Research on field emission cold cathode electron gun[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022 (姜芮芮. 场发射冷阴极 电子枪研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022 (in Chinese))
- [8] Back T C, Gruen G, Park J, et al. Electron emission characteristics of wet spun carbon nanotube fibers[J]. AIP Advances, 2019, 9(6): 065319
- [9] Park S, Gupta A P, Yeo S J, et al. Carbon nanotube field emitters synthesized on metal alloy substrate by PECVD for customized compact field emission devices to be used in X-ray source applications[J]. Nanomaterials, 2018, 8(6): 378
- [10] Ji Q, Wang B, Zheng Y, et al. Field emission performance of bulk graphene[J]. Diamond and Related Materials, 2022, 124: 108940
- [11] Li N, Yan F, Pang S, et al. Novel nanofabricated Mo field-

emitter array for low-cost and large-area application[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(10): 4369–4374

- [12] Bhattacharya R, Karaulac N, Chern W, et al. Temperature effects on gated silicon field emission array performance[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2021, 39(2): 023201
- [13] Dwivedi N, Dhand C, Carey J D, et al. The rise of carbon materials for field emission[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(8): 2620–2659
- [14] Cui Y K, Zhang X B, Lei W, et al. Research on high current carbon nanotube field emission cathode[J]. Intense Laser and Particle Beam, 2013, 25(6): 1509–1512 (崔云康,张晓兵, 雷威, 等. 大电流碳纳米管场发射阴极研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1509–1512 (in Chinese))
- [15] Liu J, Chen X Q, Wang Q L, et al. Electron optical design of carbon nanotube cold cathode electron gun[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2014, 12(3): 339–344 (刘京, 陈心全, 王琦龙, 等. 碳纳 米管冷阴极电子枪的电子光学设计 [J]. 太赫兹科学与 电子信息学报, 2014, 12(3): 339–344 (in Chinese))
- [16] Chen X Q, Wang Q L, Cui Y K, et al. Acquisition and characteristics analysis of high current density field emission cathode[J]. Proceedings of the 19th Annual Conference of the Vacuum Electronics Branch of the Electronic Society (Volume 2), 2013 (陈心全, 王琦龙, 崔云康, 等. 大电流密度场致发射阴极的获得及其特性分析 [J]. 电 子学会真空电子学分会第十九届学术年会论文集(下 册), 2013 (in Chinese))