

文章编号 1004-924X(2025)11-1700-13

磁浸没热场发射电子枪

赵伟霞^{1,2}, 张利新^{1*}, 刘俊标^{1,2*}, 殷伯华^{1,2}, 韩立^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所微纳加工技术与智能电气设备研究部, 北京 100190;

2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 为了提高扫描电镜等设备的探针束流, 设计了磁浸没式热场发射电子枪, 可对电子枪阴极发射电子进行有效收集, 提高有效的发射束流。对磁浸没热场发射电子枪的电子光学特性进行了理论分析, 仿真对比了单极靴、双极靴轴向间隙、双极靴径向间隙3种结构的磁透镜性能。基于双极靴轴向间隙结构的透镜设计了磁浸没式电子枪, 仿真分析了束斑、束流、角束流密度、亮度等参数随浸没透镜的变化情况。基于实验平台对浸没透镜的磁场分布与磁浸没式电子枪的有效发射束流进行了测试。实验结果表明: 浸没透镜磁场实际分布值与仿真值基本一致; 在相同光阑尺寸下, 磁浸没式电子枪的有效发射束流在 3.3 kV 低加速电压下为 44.97 nA, 23.5 kV 高加速电压下为 638.12 nA, 与普通热场发射电子枪相比提高了约 4 倍。

关键词: 电子光学; 热场发射电子枪; 磁浸没透镜; 双极靴透镜

中图分类号: TN16 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253311.1700

CSTR: 32169.14.OPE.20253311.1700

Thermal field electron gun immersed in magnetic lens field

ZHAO Weixia^{1,2}, ZHANG Lixin^{1*}, LIU Junbiao^{1,2*}, YIN Bohua^{1,2}, HAN Li^{1,2}

(1. *Research Department of Micro-nano Fabrication Technology and Intelligent Electronic Devices, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

** Corresponding author, E-mail: zhanglx@mail.iee.ac.cn; liujb@mail.iee.ac.cn*

Abstract: To enhance the probe beam current of scanning electron microscopes and related devices, a thermal field electron gun immersed in a magnetic lens field was designed to collect electrons emitted from the cathode and increase the effective emitted beam current. The optical properties of the magnetic field-immersed thermal field electron gun were theoretically analyzed, and the performance of three magnetic lens configurations—single polepiece, double polepiece with axial gap, and double polepiece with radial gap—was simulated and compared. A magnetic field-immersed electron gun was subsequently developed based on the double polepiece with axial gap lens, and the variations in beam spot size, beam current, and angular current density in response to the magnetic immersion lens were examined. Experimental measure-

收稿日期: 2025-02-27; 修订日期: 2025-05-05.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFF0709400); 中国科学院科研仪器设备研制项目 (No. PTYQ2024BJ0004)

ments of the magnetic field distribution of the immersion lens and the effective emitted beam current of the magnetic field-immersed electron gun were conducted using a dedicated platform. Results demonstrate that the measured magnetic field distribution closely matches simulation predictions. The effective emitted beam current reached 44.97 nA at a low acceleration voltage of 3.3 kV and 638.12 nA at a high acceleration voltage of 23.5 kV, representing an approximate fourfold increase compared with conventional thermal field electron guns.

Key words: electron optics; thermal field electron gun; magnetic immersion lens; double polepiece lens

1 引言

高亮度和高分辨一直是电子显微镜、电子束缺陷检测和电子束曝光机等电子束设备发展的目标。随着设备功能的扩展,如扫描电镜结合能谱仪等探测器进行微结构晶体分析和成分分析、电子束缺陷检测设备对半导体器件进行电性检测等,在保证一定分辨率的同时具备高检测效率,这需要大探针束流^[1-5]。ZrO/W 热场发射电子枪具有高亮度的特性,在电子显微镜和电子束检测等设备中获得了广泛应用^[6-7],但却存在有效发射束流小的问题。由于阴极发射的电子束呈发散状态,在经过电子枪光阑时大部分被遮挡,有效发射角很小,实际出射的电子束束流约占总发射束流的 0.1%,导致探针电流很小。通过加大光阑孔径以增加发射角,像差则会增加,降低电子枪的有效亮度。因此,在不影响有效亮度的前提下,提高热场发射电子枪的有效发射束流十分重要。

磁浸没式热场发射电子枪是实现高有效发射束流的可行方案。通过设计和集成一个磁透镜,令阴极尖端浸没在透镜磁场中,电子刚出射阴极即被磁场会聚,可增加角束流密度,在原有光阑孔径下获得远高于普通热场发射电子枪的电子束流,从而提升电子束的检测效率。同时,这种磁浸没电子枪的像差比静电透镜电子枪或在电子枪后单独加一个磁透镜小得多^[8-10]。目前,国外已有多种形式的磁浸没式热场电子枪,主要有单极靴磁透镜^[11]、预加压双极靴磁透镜^[12]、离子泵磁透镜^[13]和双极靴小口径磁透镜^[14],可在 1 kV 低压下获得 6 nA 的探针束流,但存在高压绝缘、预对中难度高、不具备普适性等问题。除了热场发射电子枪外,磁浸没透镜也应用于提升冷场发射电子枪的探针束流,如

1.2 MeV 透射电镜^[15]、碳纳米管微型硅针尖冷场发射电子源系统^[16]。目前,采用磁浸没电子枪技术的产品有日本 JEOL 公司的浸没式场发射电子枪(In-len Schottky Plus)扫描电镜^[17-18],采用单极靴磁浸没透镜和四级磁透镜聚焦系统,探针束流在加速电压 5 kV 时达到 100 nA,在 30 kV 时达到 500 nA,用于样品材料成分分析。国内对磁浸没式电子枪的研究主要为理论与仿真研究,姚俊恩^[19]分析了多种类型磁场的磁浸没场发射电子枪的像差。程敏^[20-21]等基于宽束曲轴像差理论对用于投射式电子束曝光系统的磁浸没透镜进行了理论优化设计。陈喜亚^[22]等研究了单极靴透镜磁浸没场电子枪的光轴对中方法。

本文针对扫描电镜等电子束设备大探针束流的需求,研制了磁浸没式热场发射电子枪,对磁浸没透镜的设计方法进行了研究,分析对比了单极靴、双极靴径向间隙和双极靴轴向间隙 3 种不同结构的浸没透镜的电子光学特性,并采用轴向间隙的双极靴磁透镜进行了浸没式电子枪仿真分析与设计,最后对该电子枪性能进行了测试,可有效提高电子枪的有效发射束流,为今后进一步应用于高通量、大束流的电子探针分析、电子束缺陷检测、多束成像、变形电子束光刻、高能电子衍射等领域提供了技术基础。

2 特性分析与系统设计

2.1 工作原理与特性分析

磁浸没式热场电子枪的工作原理如图 1 所示,包括普通热场发射电子枪以及磁浸没透镜。热场发射电子枪主要包括阴极也称灯丝、抑制极、吸出极和阳极,其中,吸出极提供阴极尖端发射所需的 10^8 V/m 量级的场强,阳极使电子束加

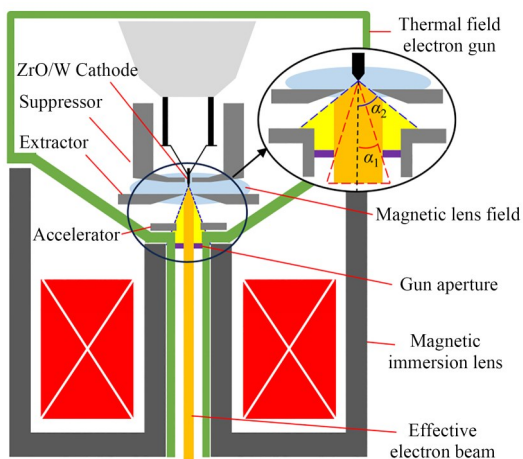


图1 磁浸没式热场发射电子枪结构与工作原理

Fig. 1 Schematic structure and principle of thermal field electron gun immersed in magnetic lens field

速到所需的能量。磁浸没透镜在电子枪灯丝周围区域产生磁场,使得阴极浸没在磁场中,电子在射出阴极表面后被磁场会聚,原来发散状态中被光阑遮挡的电子现在以平行或聚焦状态出射,如图1中的局部放大图所示。无磁场时,电子束呈发散状态,只有束半角 α_1 内的电子可以通过光阑,其他部分被吸出极光阑、阳极光阑和电子枪光阑依次遮挡;施加磁场后,电子在从阴极发射后的运行过程中不断聚焦,最终使得束半角 α_2 内的电子会聚并通过光阑,提高了电子束的角束流密度,从而在光阑尺寸不变的条件下获得更大的电子枪发射束流。

热场发射电子枪的性能参数主要有约化亮度 B_r 、角束流密度 I' 及虚源直径 d_v 。其中,最关键的参数为约化亮度,即单位加速电压、单位面积、单位立体角内的束流大小。3个参数分别为^[23]:

$$B_r = \frac{I'}{\pi d_v^2} = 1.44 \frac{e J_{ES}}{\pi k T}, \quad (1)$$

$$I' = \frac{J_{ES} (r\varphi)^2}{\theta^2}, \quad (2)$$

$$d_v = 1.67 \frac{r\varphi}{\theta} \sqrt{\frac{kT}{eV}}, \quad (3)$$

式中: e 为电子电荷, k 为玻尔兹曼常数, T 为灯丝工作温度, r 为阴极尖端的曲率半径, φ 为阴极表面发射电子对应的圆心角, θ 为电子达到无场空间后与光轴的夹角, V 为加速电压, J_{ES} 为阴极表

面发射束流密度,可表示为^[24]:

$$J_{ES} = \frac{4\pi m e (kT)^2}{h^3} \exp\left(\frac{-\phi + e^{3/2} F^{1/2}}{kT}\right) \frac{\pi q}{\sin(\pi q)}, \quad (4)$$

式中: m 为电子质量, h 为普朗克常数, ϕ 为灯丝材料的功函数; F 为电场强度,与阴极尖端结构、电子枪结构与抑制极、吸出极电压有关; q 为无量纲参数,正比于 $F^{3/4}/T$,用于表征隧道发射束流占比。

根据式(1)和式(4)可知,电子枪的约化亮度 B_r 只与 T, F, ϕ 有关,不受外加磁场的影响,因此,磁浸没式热场发射电子枪的约化亮度不会提高,这使得角束流密度与虚源尺寸两者相互制约。在磁场的会聚作用下,发射电子与光轴夹角 θ 变小,虚源处的角放大倍数 $M = \theta/\varphi$ 减小。根据式(2)和式(3), $I' \propto M^{-2}$, $d_v \propto M^{-1}$,当电子枪角束流密度提高 M 倍时,虚源尺寸也会增加 $\sqrt{M}$ 倍。磁浸没式电子枪实现大束流性能的同时束斑也会变大,因此,采用磁浸没式电子枪的系统一般需要增加一级聚焦透镜,实现大束流和小束斑性能的切换。

磁浸没透镜的像差也会影响束斑尺寸,降低电子枪的有效亮度。由于热场电子枪发射电子的初始能量较低,浸没透镜的色差不能忽略,但可以忽略衍射像差的影响。根据Barth-Kruit束斑公式^[23],磁浸没式热场发射电子枪束斑 d_i 表示为:

$$d_i = \sqrt{[d_g^{1.3} + d_s^{1.3}]^{2/1.3} + d_c^2}, \quad (5)$$

$$d_g = M d_o, \quad (6)$$

$$d_s = 0.18 C_s \alpha_i^3, \quad (7)$$

$$d_c = 0.34 C_c \alpha_i \frac{dV}{V_i}, \quad (8)$$

式中: d_g 为高斯像直径, d_s 为球差, d_c 为色差; M 为浸没透镜的放大倍率,定义为像距与物距的比值; d_o 为物方束斑直径, α_i 是像方束半角, dV 为电子束能量散度, V_i 为加速电压; C_s 为球差系数, C_c 为色差系数,分别表示为 $C_s = C_{so}(1+M)^4$, $C_c = C_{co}(1+M)^2$, C_{so} , C_{co} 分别为物方球差系数与物方色差系数^[25]。磁浸没透镜的磁场峰值一般位于枪尖处且磁场分布半宽度较窄,此时电子枪像差较小^[19]。这意味着物距很小, C_s 和 C_c 随像距

的增加而迅速增大,尤其 C_s 会急剧增大。因此,浸没式电子枪的设计重点是低球差、低色差、短焦距的磁浸没透镜,在满足大束流的同时,减小对有效亮度的影响。

2.2 磁浸没透镜设计

低像差磁浸没透镜的设计需要同时考虑光学性能与结构集成。对于磁浸没电子枪,若将浸没透镜集成于电子枪高压组件上方,会面临结构复杂、调节困难、超高真空实现、高压绝缘等难题,因此,浸没透镜一般位于电子枪下方,极靴探入电子枪枪室内,阴极高压组件浸没在极靴产生

的磁场中。电子枪内外部的高压绝缘、电磁屏蔽、透镜与电子枪的机械耦合等问题,限制着磁浸没透镜的结构设计,进而影响其光学性能。

磁浸没透镜为单极靴透镜时,极靴附近的磁场强度很大,整体分布半宽度较小,因此像差小,但周围磁路材料的对称性、线圈绕制的整齐度等因素都会影响轴对称性^[26]。双极靴可以大大减小制作误差的影响,主要分为轴向间隙与径向间隙两种结构^[27]。3种结构的浸没场透镜如图2所示,上图是结构示意图,包括极靴、磁路和线圈;下图为实际结构下仿真得到的磁感线分布。

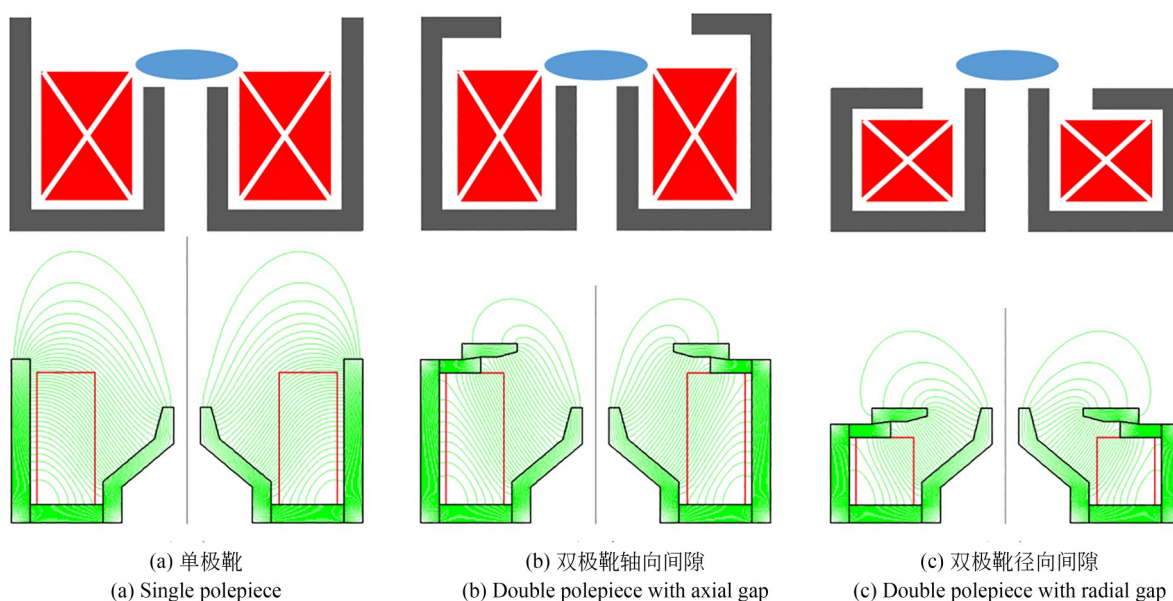


图2 三种磁浸没透镜结构示意图

Fig. 2 Structures of three magnetic immersion lenses

基于 Munro's Electron Beam Software (MEBS) 仿真软件对3种极靴结构的浸没透镜的电子光学特性进行计算。在相同激励下,3种透镜轴上的磁场分布如图3所示。在灯丝位于浸没磁场峰值处、电子束聚焦至同一像平面时,3种透镜的电子光学性能如表1所示。其中, $B_{z\max}$ 为轴上磁场峰值, $z_{\max}$ 是轴上磁场峰值的位置, $B_{c\max}$ 磁路磁场峰值。可以看出,单极靴透镜的像差较小,结构易实现,但轴上磁场强度低,需要较大的激励。双极靴径向间隙透镜磁场半宽度小,在保证小像差的同时减小所需激励,且占用电子枪空间小,但线圈可安装空间小,线圈电流密度较高。这意味着线圈发热量大,需要增加水冷系统以保

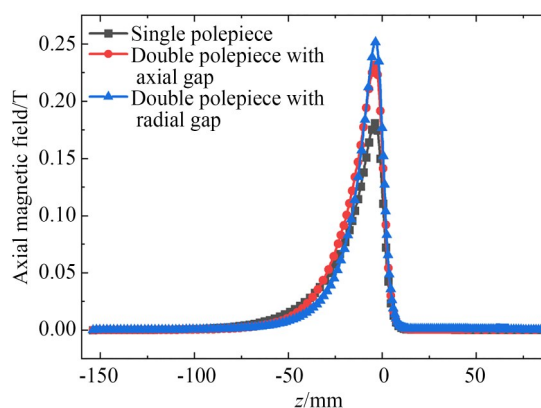


图3 相同激励下3种磁浸没透镜的轴上磁场分布

Fig. 3 Distributions of axial magnetic field of three magnetic immersion lenses under same excitation

表 1 三种磁浸没透镜电子光学性能仿真结果

Tab. 1 Simulation results of electron optical properties of three magnetic immersion lenses

Lens structures	Lens excitation /At	Field half- width /mm	B_{zmax} /T	z_{max} /mm	C_s /m	d_s /nm	B_{cmax} /T	Coil cur- rent density /(A·cm ⁻²)
Single polepiece	3 101.55	17.91	0.13	-3.90	5.41	1.26	0.97	290.45
Double polepiece with radial gap	2 234.68	14.95	0.13	-3.38	6.12	1.65	0.97	407.79
Double polepiece with axial gap	2 421.71	17.41	0.13	-3.90	5.48	1.28	0.88	226.79

证电流稳定性。双极靴轴向间隙透镜是常用的磁透镜形式,其像差小,轴上磁场强度较高,所需激励适中,磁路上的磁场强度也最低,不易产生磁饱和现象,因此综合性能较好。但上极靴会探入电子枪,占用较多空间,造成机械设计、高压绝缘、烘烤除气等方面的设计难度增加。

这里选择双极靴轴向间隙透镜,采用非对称结构,上极靴孔 D_1 大,提供一定几何空间范围分布的磁场,满足电子枪的高压绝缘需求;下极靴孔 D_2 小,使得像空间的场急剧减小,磁场分布变窄,有助于减小像差。对于非对称透镜,以上下极靴间距 S 和极靴平均直径 $D=(D_1+D_2)/2$ 为透镜的几何参量, S/D 的选取极大影响着透镜性能,其工作距离 l 与球差系数 C_s 之比 l/C_s 和加速电压 V_r 与透镜激励平方之比 $V_r/(NI)^2$ 的关系如图 4 所示^[28]。其中, N 为透镜线圈的匝数, I 为通过透镜线圈的电流。可以看出,当 $V_r/(NI)^2 < 0.03$ 时, S/D 对 l/C_s 的影响较大,通常 S/D 的值

越小,相应的透镜性能越好,但不能太小,易产生磁饱和现象。

在磁浸没式热场电子枪中,为了使阴极发射电子出射阴极表面后尽快会聚,磁场峰值位于阴极尖端处,即物点位于磁场内,只利用峰值场强后(称为后场)像空间部分的磁场。电子束通过磁浸没透镜后场时会聚为类平行电子束,此时透镜焦点位于阴极处,焦距很短,其球差与色差系数可表示为: $C_s=5f^3/L$, $C_c \approx f$, 其中 f 为透镜焦距, L 是透镜特征长度^[24]。可以看出,透镜焦距越小,其球差与色差系数也越小。短焦透镜一般为强磁透镜, $V_r/(NI)^2 < 0.01$, 但强磁透镜不会使用小的 S/D 值,因为 NI 大而 S 小的极靴容易产生磁饱和现象。综合考虑下,通过数值计算,确定磁浸没透镜的极靴结构尺寸为 $S=19\text{ mm}$, $D_1=59\text{ mm}$, $D_2=10\text{ mm}$, $S/D=0.55$, 以满足聚焦系统的性能指标。

2.3 磁浸没热场发射电子枪设计

确定浸没透镜结构后,利用 MEBS 仿真软件对磁浸没式热场电子枪的性能进行计算,建立的电子枪结构模型与仿真得到的电子束运动轨迹如图 5 所示。初始仿真参数如表 2 所示,仿真得

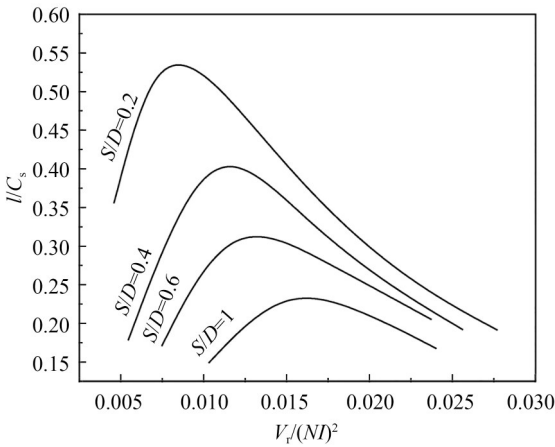


图 4 l/C_s 与透镜的激励强度 $V_r/(NI)^2$ 的关系^[28]
Fig. 4 Relationship between l/C_s and excitation intensity of lens $V_r/(NI)^2$ ^[28]

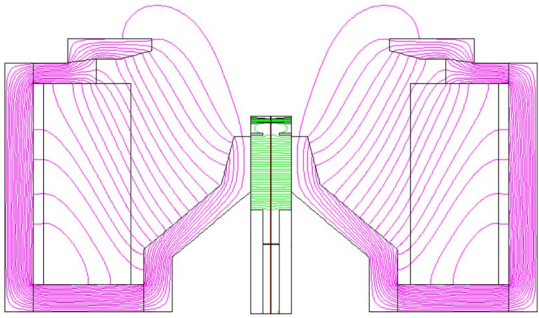


图 5 磁浸没式热场电子枪结构与电子束轨迹
Fig. 5 Structure of magnetic field immersed thermal field electron gun and electron beam trajectory

表 2 磁浸没式热场电子枪性能仿真参数

Tab.2 Simulation parameters of magnetic field immersed thermal field electron gun

Simulation parameter	Value
Tip radius / μm	1
Position of tip/mm	0
Suppressor voltage /V	-300
Extractor voltage /V	5000
Accelerator voltage /V	30000
Diameter of gun aperture/ μm	250
Position of gun aperture/mm	30.45
Diameter of polepiece /mm	Upper 59, lower 10
Polepiece gap/mm	19

到的电子枪束斑、束流等各项性能参数随透镜激励的变化情况如图 6 和图 7 所示。

图 6 展示了磁浸没式热场电子枪的束斑位置 z_i 、直径、束半角、球差系数、色差系数、角束流密度以及有效发射束流 I_e 随浸没透镜激励的变化情况。由图 6(a) 可知,当透镜激励较小时,系统成虚像;当透镜激励超过 3 370 At 时,系统成实像,随着激励的增加成像位置从无穷远处向阴极方向靠近。由图 6(b) 可知,束半角的变化呈现明显的 A, B, C 3 个阶段。A 阶段为虚源由发散向准直的变化过程,束半角逐渐减小,束半角趋近于 0 时,对应的激励电流在 3 370 At 左右,为电子束准直电流值,由垂直虚线表示。B 阶段为电子束由准直向实像聚焦的过程,像点由下方无穷远处向光阑靠近并最终穿过光阑,束半角 α_i 逐渐增加。当 $1.1 \text{ mrad} < \alpha_i < 13.4 \text{ mrad}$ 时,光阑平面上的束斑直径小于光阑孔直径,电子束不受光阑遮挡,束半角呈线性变化。C 阶段为电子束进一步聚焦的过程,束斑位置位于光阑上方,并向阴极逼近,光阑平面的束斑直径大于光阑孔直径,受光阑遮挡,束半角随着激励的增加而减小。因此,若浸没透镜采用聚焦模式,需要谨慎选择像点的位置,当像点位于光阑位置附近时,需要结合物镜光阑综合考虑束半角的大小,实现浸没透镜性能的正确计算。

由图 6(c)~6(g) 可知,角束流密度、有效束流均随着向准直状态的靠近而增加,但同时束斑直径、球差系数、色差系数也随之增加。因此,角束流密度不是越大越好,要综合考虑束斑因素来

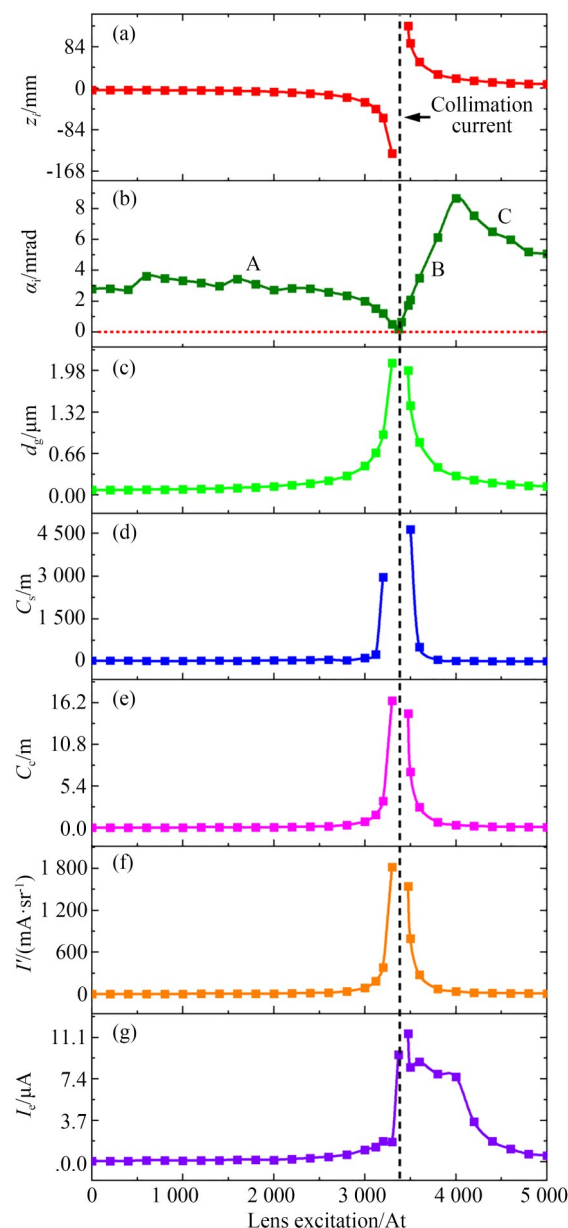


图 6 磁浸没式热场电子枪性能随透镜电流的变化情况
Fig.6 Performance variation of magnetic field immersed thermal field electron gun with lens current

选择聚焦电流。由于球差系数、色差系数随着像距增加急剧增加,小束半角是限制球差弥散斑 d_s 、色差弥散斑 d_c 的重要因素。根据式(7)和式(8),当束半角 $\alpha \rightarrow 0$ 时, $d_s \rightarrow 0$, $d_c \rightarrow 0$ 。因此,浸没式电子枪一般选择准直束,以降低浸没透镜的像差对亮度的影响,并减少束流的传输损耗,获得相对大束流、小束斑的电子束。

图 7 展示了磁浸没式热场电子枪的约化亮度随浸没透镜激励的变化情况,定义 $\Delta = B_r/B_{r0}$ 为

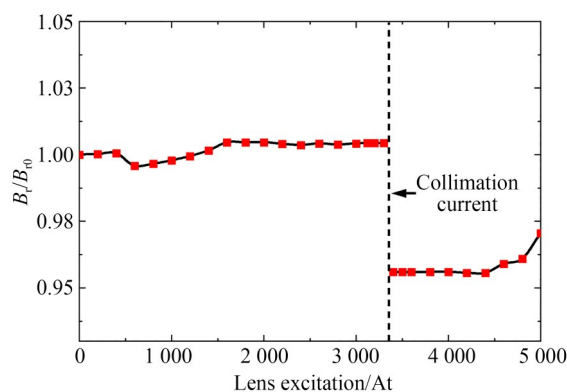


图7 磁浸没式热场电子枪约化亮度随透镜电流的变化情况

Fig. 7 Variation of reduced brightness of magnetic field immersed thermal field electron gun with lens current

约化亮度变化率,其中 B_r, B_{r0} 分别为有磁浸没场与无浸没场下的约化亮度。可以看出,准直前的虚源状态下,电子枪约化亮度随着透镜电流的增加而略微提升,基本维持不变。这是由于仿真参数中设置了电子枪光阑,该约化亮度为电子枪光阑对应束半角下计算得到的有效约化亮度。对于热场发射阴极,阴极表面发射束流密度与灯丝工作温度、电场强度、功函数有关,其发射尖端为(100)晶面平面,从平面中心靠近外侧,局部曲率变小,电场强度升高,阴极局部发射束流密度增大^[29]。浸没式磁场使得阴极尖端平面更大范围内的发射束流出射电子枪,因此,对应的有效阴极发射束流密度有所提高,使得该范围内的约化亮度略微增加,经过计算一般不超过1%。透镜电流超过准直电流后,电子束形成交叉斑,约化亮度总体降低,并随着准直电流的增加略有提高。这是由于束半角先迅速增加后降低(如图6(b)中B,C阶段所示),有效约化亮度先下降后增加。

为进一步分析浸没式电子枪的工作模式,基于MEBS软件对浸没式电子枪与聚焦光柱体联合安装后的整体电子光学系统性能进行了仿真分析。系统采用磁浸没透镜、聚光镜和物镜组成的三级磁透镜聚焦系统,整体结构与不同工作模式下的光路如图8所示。图8(a)中,EL1是电子枪加速透镜,ML1是浸没透镜,ML2为聚光镜,ML3为物镜,后两者组成聚焦光柱体,系统根据不同工作模式存在一个或两个中间像点。磁浸

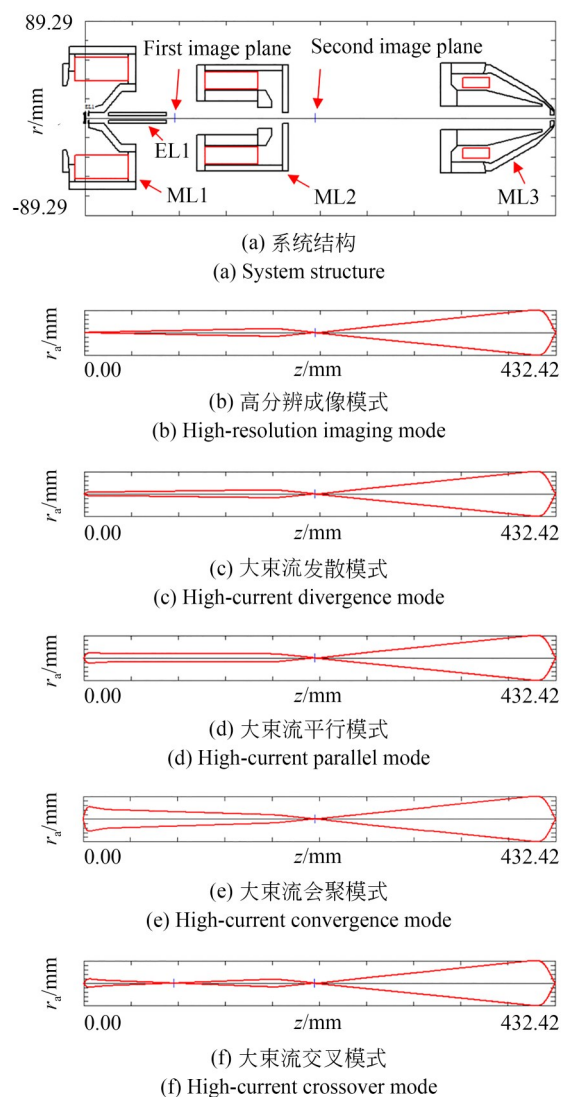


图8 磁浸没式电子光学系统结构与不同工作模式下的光路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of structure of magnetic filed immersed electron optical system and optical path under different working modes

没式电子光学系统可在多种模式下工作,常规条件下,浸没场透镜不启用,电子光学系统工作在高分辨成像模式,如图8(b)所示。当需要大探针束流时,启动浸没场透镜,系统工作在大束流模式,随着浸没透镜激励的增加,依次工作在发散模式、平行模式、会聚模式与交叉模式,分别如图8(c)~8(f)所示。聚光镜随浸没透镜同步调节激励,使得中间像点2位置不变,物镜激励保持恒定。

不同工作模式下,系统的电子光学特性如表3所示。其中, α_0 是物方束半角, M_1 是束流增加

倍数,定义 $M_1 = I_i/I_{i0}$, I_{i0} , I_i 分别为磁浸没透镜激励为 0 与不为 0 时样品表面的探针束流。由图 7 可知,透镜激励范围内的亮度变化很小。假设亮度不变的情况下,探针束流的计算公式如下:

$$I_i = I_o' \pi \alpha_i^2 \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \frac{V_i}{V_o}, \quad (9)$$

式中: I_o' , r_o , V_o 分别为电子源平面(物方)的角束流密度、束斑直径和电子束能量, r_i , α_i , V_i 分别为样品平面(像方)的束斑直径、束半角、电子束能量。

从表 3 可以看出,随着磁浸没透镜激励的增加,系统的探针束流和样品束斑均同步增加,在会聚模式下达到最大,束流增加倍数为 584.1 倍,束斑为 23.9 nm;达到交叉模式后逐步减小,同时

在交叉模式可以实现与发散模式相近的性能,但要求激励更大。因此,磁浸没透镜主要工作在发散模式与平行模式,以控制样品束斑和减小透镜尺寸,并且在平行模式下的探针束流最高。随着透镜激励的增加,物方束半角增大,阴极尖端更大范围内的电子到达样品平面。对于热场发射电子枪, I' 在几十个 mrad 束半角范围内分布较为均匀,可近似认为相等。根据式(9)估算,探针束流提高约 10~100 倍,在 $I_o' = 0.5 \text{ mA/sr}$ 时探针束流达到 473.1 nA,其束流可调节范围大,且连续可调。此外,系统的球差与色差随透镜激励变化不大,最终的样品束斑主要受高斯束斑的影响,通过调整磁浸没透镜激励,可在不切换物镜参数的条件下兼顾大束流快速检测和小束流高分辨成像。

表 3 磁浸没式电子光学系统不同工作模式下的性能仿真结果

Tab. 3 Simulation results on property of magnetic field immersed electron optical system under different working modes

Working modes	Lens excitation/At	α_o/mrad	M	d_g/nm	d_s/nm	d_c/nm	d_i/nm	M_1
High resolution	0	0.15	0.009	0.20	0.77	0.29	0.97	—
Divergence	3 139	1.53	0.093	2.61	0.77	0.30	3.05	7.3
	3 204	2.15	0.130	3.64	0.77	0.30	4.05	14.2
	3 293	4.82	0.291	8.18	0.78	0.37	8.51	71.5
Parallel	3 307	5.93	0.358	10.06	0.80	0.40	10.37	108.1
Convergence	3 323	8.23	0.497	13.96	0.86	0.51	14.27	208.3
	3 332	10.30	0.622	17.49	1.00	0.64	17.83	326.8
	3 340	13.78	0.832	23.38	1.49	0.92	23.90	584.1
Crossover	3 438	4.83	-0.292	8.20	0.78	0.37	8.53	71.8
	3 528	2.17	-0.131	3.69	0.77	0.30	4.09	14.5
	3 596	1.53	-0.093	2.60	0.77	0.30	3.05	7.22

在电子光学系统中,样品平面的像差主要由物镜决定^[26]。表 3 仿真结果也表明,磁浸没透镜的像差被聚焦光柱体进一步缩小后对系统的影响较小,这意味着对于高倍聚焦光柱体的电子光学系统,如扫描电镜、电子束曝光机、多束成像系统等,对磁浸没透镜的像差要求可以降低。本文基于扫描电镜大探针束流、多束成像系统准直束需求背景,为降低电子枪加工难度,将阴极调整至磁场峰值上方 17.75 mm 处,此时磁浸没透镜的像差系数会增大^[19],但在平行模式下对系统像差影响较小。通过 MEBS 计算,系统样品平面的球差保持为 0.77 nm,色差由 0.29 nm 增加至

0.30 nm,最终样品束斑为 2.58 nm,束流增加倍数为 7.3。该设计在控制像差影响的同时,减少了双极靴轴向间隙透镜探入电子枪的空间尺寸,可大大降低机械加工、真空密封、高压绝缘、透镜散热等方面的设计难度。然而,由于阴极的位置调整增加了整体系统的物距,整体系统的束流增加倍数有所降低。

为方便测试,设置法拉第杯所在位置 158.50 mm 处为像平面,电子束为类平行束射出,基于 MEBS 软件进行仿真,其电子枪仿真参数与性能结果如表 4 所示。在加速电压为 30 kV 时,电子枪的有效发射束流为 726.52 nA。

表 4 磁浸没式热场电子枪仿真参数与结果

Tab.4 Simulation parameters and results of magnetic field immersed thermal field electron gun

Performance Parameters	Without magnetic field	Magnetic field immersed
Tip radius/ μm	0.5	0.5
Suppressor voltage/V	-300	-300
Extractor voltage/V	5 000	5 000
Accelerator voltage/V	30 000	30 000
Lens excitation/At	—	1 520.0
Reduced brightness/ $(\text{A}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{V}^{-1})$	3.26×10^8	3.25×10^8
Dimeter of crossover/nm	22.30	192.26
Position of crossover/mm	-2.43	158.58
Spherical aberration/nm	5.95	871.06
Chromatic aberration/nm	0.93	51.98
Beam half-angle/mrad	3.34	0.91
Angular intensity/ $(\text{mA}\cdot\text{sr}^{-1})$	3.80	283.69
Effective beam current/nA	133.11	726.52

3 实 验

3.1 实验平台

基于仿真结构参数与结果,本文搭建了磁浸没式热场发射电子枪实验样机和测试平台,如图 9 所示。磁浸没热场发射电子枪主要包括热场发

射电子枪、磁浸没透镜、对中系统等。测试平台主要包括法拉第杯组件、Micronix PPX50 精密位移台、YAG 荧光屏、CMOS 相机、Keithley 6482 皮安表和电流源等。其中,法拉第杯组件包括光阑、法拉第杯、电子束通道和磁屏蔽装置等,光阑平面距离阴极尖端 158.50 mm。测试平台可通过精密位移台控制扫描、更换不同孔径尺寸光阑、荧光屏成像等方式对电子束束斑、束流、束半角以及(角)束流密度分布等参数进行测量,实现位移分辨率 50 nm,束流分辨率 10 fA。

3.2 磁浸没透镜磁场分布测试

由于磁场性能直接影响浸没式电子枪性能,首先测试磁浸没透镜的轴上磁场分布与饱和磁场分布。磁场测量平台包括 BELL 8030 高斯计、ZOA83 磁场探测三轴探头、位移数控平台、上位机控制系统和电流源。在浸没场透镜线圈中通入 1.86 A 电流(对应 1520 At 透镜电流),改变探头的轴向距离,测出轴上各位置的轴向磁场分布并与仿真值进行对比,结果如图 10 所示。可以看出,轴上磁场测试值与仿真值基本一致,表明浸没场透镜的加工品质与装配精度较好。

将磁场探头置于轴向磁场强度最大位置处,透镜电流在 0.5~2.5 A 内变化,各电流下的峰值场强测量结果如图 11 所示。磁场峰值随电流呈线性变化,表明磁透镜在此电流范围内未发生饱和,工作状态正常。

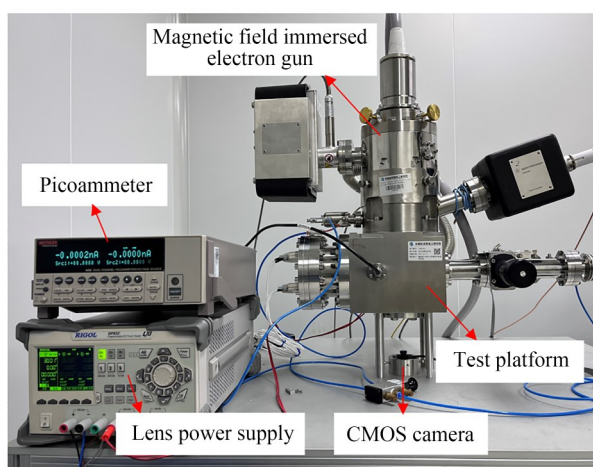
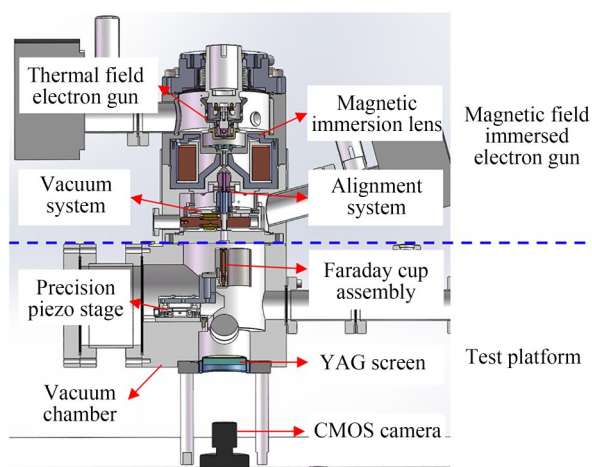


图 9 磁浸没式热场发射电子枪实验平台

Fig. 9 Experimental platform of magnetic field immersed thermal field electron gun

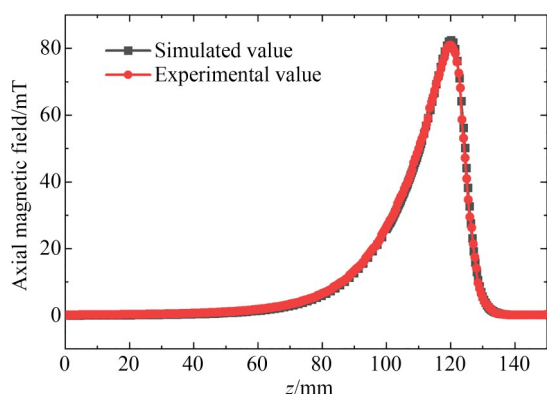


图 10 磁浸没透镜轴上磁场仿真值与测试值对比

Fig. 10 Comparison between simulated and measured results of on-axis magnetic field in magnetic immersion lens

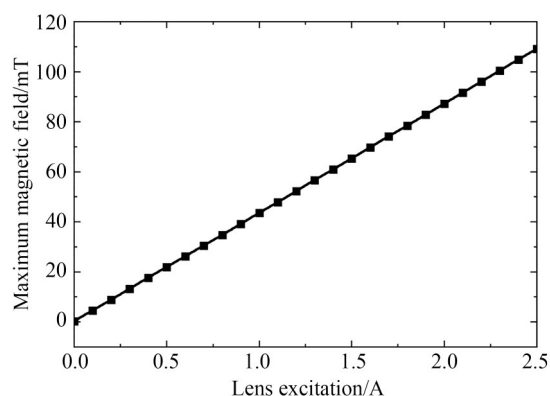


图 11 磁浸没透镜饱和磁场测试结果

Fig. 11 Test results of saturation magnetic field in magnetic immersion lens

3.3 电子枪有效发射束流测试

测试有效发射束流需要先调整磁浸没式热场电子枪为类平行束状态。设置灯丝电流为 2.3 A,抑制极电压为 300 V,吸出极电压为 3.2 kV,加速电压为 5 kV。调节磁浸没透镜激励,电子束在荧光屏上的变化过程如图 12 所示。荧光屏与灯丝距离为 272.35 mm,距离较远,当电子束聚焦至荧光屏时,可认为电子束为近平行束。通过法拉第杯采集束流,进一步微调电流,获得的最大值即为电子枪的有效发射束流。在此过程中,法拉第杯采集束流随磁聚焦的变化曲线如图 13 所示。可以看出,随着聚焦电流的增加,电子枪的有效发射束流增加,并在近平行束时达到最大,之后随着浸没透镜激励的增加而减小,变

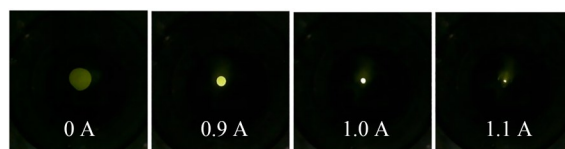


图 12 电子束聚焦过程

Fig. 12 Focusing process of beam spot

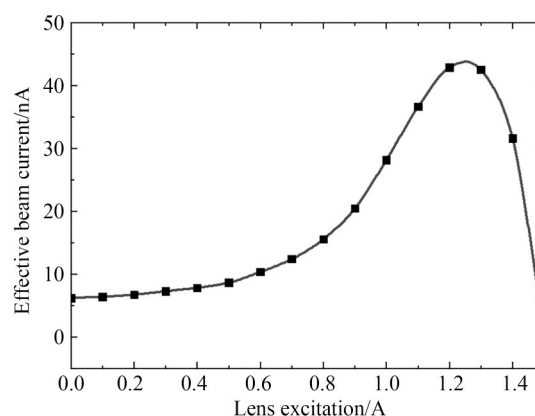


图 13 电子枪有效发射束流随浸没透镜激励的变化情况

Fig. 13 Variation of effective beam current of electron gun with magnetic immersion lens excitation

化趋势与理论分析相符。

电子束在运行过程中先后受到浸没磁场聚焦和加速电场聚焦,令加速电压与吸出极电压相等,可避免后续的加速电场聚焦,单独测试磁浸没透镜对电子源有效性能的影响和低加速电压下的电子枪性能。其他条件保持不变,调整吸出极电压,有效发射束流随吸出极电压的变化如图 14 所示。可以看出,开启浸没透镜后电子枪的有

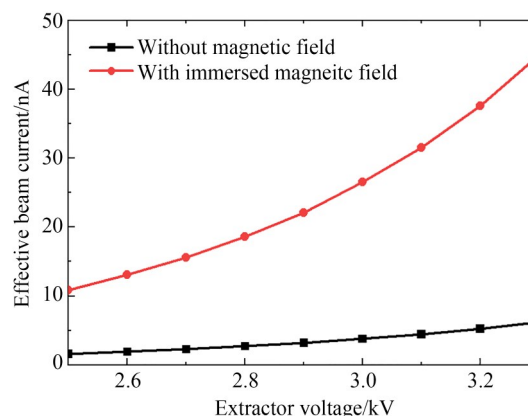


图 14 磁浸没式电子枪有效发射束流随吸出极电压的变化

Fig. 14 Variation of effective beam current of magnetic field immersed electron gun with extractor voltage

效发射束流明显增大,在吸出极电压为3.3 kV时由6.5 nA增加到44.9 nA;而常规热场发射电子枪在同样条件下的束流只有10.6 nA(通过 $I=I'\pi\alpha^2$ 计算得到,式中 $I'=0.2$ mA/sr, α 为250 μ m光阑对应的束半角4.1 mrad)。此外,随着吸出极电压的提高,束流增加倍数由6.8提高至7.2。这是由于在此吸出极电压范围内,热场发射阴极的角束流密度随着吸出极电压的提高由高斯分布向均匀分布转变^[29],使得更大束半角范围内的角束流密度均值更高,因此提高了束流增加倍数。

进一步测试磁浸没式热场电子枪在高加速电压下的有效发射束流。固定吸出极电压3.2 kV,其他参数不变,令加速电压从3 kV增加到23.0 kV,电子枪的有效发射束流如图15所示。可以看出,电子枪的有效发射束流随加速电压的增加而增大,在加速电压为23.0 kV时可达613.8 nA,高于常规热场发射电子枪在同样电子枪光阑尺寸下的有效发射束流(100~200 nA)。

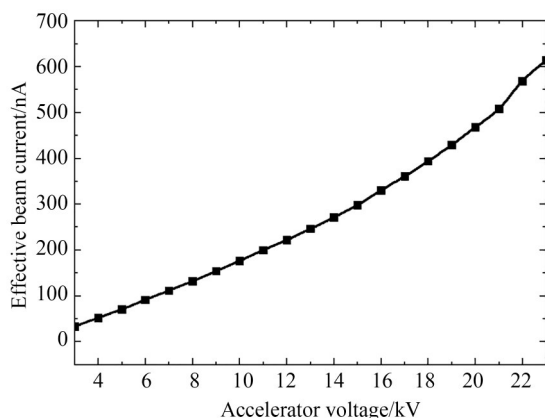


图15 磁浸没式电子枪有效发射束流随加速电压的变化
Fig. 15 Variation of effective beam current of magnetic field immersed electron gun with accelerator voltage

4 结 论

本文针对扫描电镜大探针束流的需求,研制了磁浸没式热场发射电子枪,对磁浸没式电子枪的电子光学特性和磁浸没透镜的设计方法进行了理论与仿真研究,对比了单极靴、双极靴径向间隙、双极靴轴向间隙3种不同结构浸没式磁透镜的特性。其中,双极靴轴向间隙透镜的综合性

能较好,采用该透镜进行了磁浸没式热场发射电子枪的仿真设计。结果表明,磁浸没式热场发射电子枪的约化亮度不会随透镜激励的增加而提高,因此有效发射束流与束斑相互制约,需要与高倍聚焦光柱体系统结合进行大束流与小束斑工作模式的切换,以兼顾高通量检测与高分辨成像性能。仿真结果表明,整体系统的探针束流在加速电压为30 kV时可达473.1 nA,与国外产品500 nA探针束流指标较为接近。探针束流差异原因主要为:本文采用较为常用的三级磁透镜聚焦系统(磁浸没透镜、聚光镜、物镜),而国外产品采用四级磁透镜聚焦系统,在物镜上方增加了孔径角控制透镜,以约束入射物镜的电子束孔径角,减小物镜光阑对电子束的遮挡,进而在样品平面获得更大的探针束流。最后,本文对透镜性能与电子枪性能进行了实验测试,电子枪的有效发射束流在低加速电压3.3 kV时为44.9 nA,在高加速电压23.0 kV时可达613.8 nA,与常规热场发射电子枪相比(低压下10.6 nA,高压下100~200 nA),有效发射束流提高了约4倍,且动态可调。本文实现了磁浸没式热场发射电子枪方案的验证,为将来进一步应用于扫描电镜、电子探针系统、多束成像系统、变形束光刻机及高能电子衍射仪等领域提供了技术基础。

由于电子束轰击导致的真空释气问题,电子枪工作参数受到限制,实验使用的吸出极电压低于常规值,导致阴极性能减弱,有效发射束流难以进一步提高;此外,电子枪加工难度较高,阴极放置于磁场峰值上方也会导致实际有效发射束流变小,限制了束流进一步增加。这些问题将会在后续工作中逐步解决。

作者贡献声明:

赵伟霞:测量方法的提出,测量实验数据整理和分析,论文构思和撰写;

张利新:测量方法的提出,数据整理和分析,论文构思和撰写;

刘俊标:方案设计,方案指导,项目管理,论文审核与编辑;

殷伯华:电气控制,论文审核与编辑;

韩立:项目管理,论文审核。

参考文献:

- [1] 朱建华,容萍,任帅,等. ZnO 纳米棒/Bi₂S₃量子点异质结的制备及光电探测性能研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(16): 1915-1923.
ZHU J H, RONG P, REN SH, *et al.* Preparation and photodetection performance of ZnO nanorods/Bi₂S₃ quantum dots heterojunction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(16): 1915-1923. (in Chinese)
- [2] 梁惠康,段辉高. 电子束光刻设备发展现状及展望[J]. 科技导报, 2022, 40(11): 33-44.
LIANG H K, DUAN H G. Electron beam lithography system: Progress and outlook [J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40 (11): 33-44. (in Chinese)
- [3] 张利新,孙博彤,刘星云,等. 微型阵列束闸设计与实验[J]. 光学精密工程, 2024, 32(13): 2061-2069.
ZHANG L X, SUN B T, LIU X Y, *et al.* Design and experiment of micro-arrayed beam blander [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(13): 2061-2069. (in Chinese)
- [4] 段辉高,戴彭,张轶,等. 复杂图案轮廓曝光版图的生成及工艺实现[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 584-593.
DUAN H G, DAI P, ZHANG SH, *et al.* Realization of complex patterns *via* “sketch and peel” lithography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 584-593. (in Chinese)
- [5] 蒋俊海,孙伟强,王振,等. 用于集成电路制造中良率监控的国产化电子束缺陷检测设备[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 169-174.
JIANG J H, SUN W Q, WANG ZH, *et al.* Localized electron beam inspection equipment for yield monitoring in integrated circuits manufacture [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43 (1): 169-174. (in Chinese)
- [6] TUGGLE D, SWANSON L W, ORLOFF J. Application of a thermal field emission source for high resolution, high current *e*-beam microprobes [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1979, 16(6): 1699-1703.
- [7] 陈文雄,徐军,张会珍,等. 电子枪理论研究的新进展[J]. 电子显微学报, 2006, 25(6): 455-462.
CHEN W X, XU J, ZHANG H Z, *et al.* Advances in electron Gun theory research[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2006, 25 (6): 455-462. (in Chinese)
- [8] SAITO K, MORITA H, SHIMAZU N, *et al.* *New Design for a Field Emission Electron Gun Immersed in a Magnetic Lens Field* [M]. SPIE, 1995.
- [9] SAITO K, UNO Y. Accurate electron ray tracing for analysis of electron guns immersed in a magnetic-lens field [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1995, 363(1/2): 48-53.
- [10] TAMURA K, IKUTA T, SHIMIZU R, *et al.* Performance evaluation of the magnetic field immersion type field emission Gun by boundary element method [J]. *Physics Procedia*, 2008, 1(1): 43-49.
- [11] Cleaver J R A. Field emission electron gun systems incorporating single-pole magnetic lenses [J]. *Optik*, 1979, 52(4): 293-303.
- [12] TROYON M. Magnetic field emission Gun with zirconiated emitter: Performances at low voltage [J]. *Ultramicroscopy*, 1989, 28(1/2/3/4): 98-102.
- [13] YAMAZAKI Y, MIYOSHI M, NAGAI T, *et al.* Development of the field emission electron Gun integrated in the sputter ion pump [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1991, 9(6): 2967-2971.
- [14] DELONG A, CHMELÍK J, KOLARIK V, *et al.* A new design of field emission electron Gun with a magnetic lens [J]. *Optik*, 1989, 81: 103-108.
- [15] KASUYA K, KAWASAKI T, MORIYA N, *et al.* Magnetic field superimposed cold field emission Gun under extreme-high vacuum [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2014, 32(3): 031802.
- [16] URBANŃSKI P, SZYSZKA P, BIAŁAS M, *et al.* Point field emission electron source with a magnetically focused electron beam [J]. *Ultramicroscopy*, 2024, 258: 113911.
- [17] SAKUDA Y, ISHIZAKI M, TOGASHI T, *et al.* *Chemical state analysis using Soft X-ray Emission Spectrometry in low voltage FE-SEM* [M]. European Microscopy Congress 2016: Proceedings. 2016: 847-848.
- [18] JEOL. *JSM-IT800 Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope* [EB/OL] 2024, <https://www.jeol.com>.
- [19] 姚骏恩,杨凯. 磁浸没场发射电子探针系统探讨 [J]. 光学学报, 1985, 5(4): 348-355.
YAO J E, YANG K. Magnetic field superimposed

- field emission electron Gun system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1985, 5(4): 348-355. (in Chinese)
- [20] 程敏, 唐天同. 磁浸没透镜的宽束曲轴像差理论[J]. *电子学报*, 2001, 29(6): 811-813.
CHENG M, TANG T T. Theory of curved axes aberration with wide beam for magnetic immersed lenses[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(6): 811-813. (in Chinese)
- [21] 程敏, 唐天同, 姚振华, 等. 用于投射式电子束曝光系统的磁浸没透镜的优化设计[J]. *真空科学与技术*, 2001, 21(4): 315-318.
CHENG M, TANG T T, YAO ZH H, *et al.* Optimization design of immersion magnetic lenses used for projection electron beam lithography[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2001, 21(4): 315-318. (in Chinese)
- [22] 陈喜亚, 孙伟强, 孟庆浪, 等. 浸没式磁透镜电子枪及其光轴对中的方法: CN116130323A[P]. 2023-05-16.
CHEN X Y, SUN W Q, MENG Q G, *et al.* Method for aligning the optical axis of immersion magnetic lens electron gun: CN116130323A[P]. 2023-05-16. (in Chinese)
- [23] BRONGSEEST M S, BARTH J E, SWANSON L W, *et al.* Probe current, probe size, and the practical brightness for probe forming systems[J]. *Journal of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2008, 26(3): 949-955.
- [24] ORLOFF J. *Handbook of Charged Particle Optics, Second Edition* [M]. Handbook of charged particle optics, 2008.
- [25] 严红, 沈一骑. SEM工作距离和加速电压对图像分辨率的影响[J]. *实验技术与管理*, 2011, 28(9): 44-45, 49.
YAN H, SHEN Y Q. Influences of different work distances and acceleration voltages of SEM on image resolution[J]. *Experimental Technology and Management*, 2011, 28(9): 44-45, 49. (in Chinese)
- [26] 黄兰友, 刘绪平. 电子显微镜与电子光学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
HUANG L Y, LIU X P. *Electron Microscope and Electron Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [27] TANG T, SONG J. Side pole-gap magnetic electron lenses [J]. *Optik*, 1990, 84: 108-112.
- [28] 王丽娟, 刘俊标, 赵伟霞, 等. 高功率密度微焦斑X射线源聚焦系统的设计[J]. *电子显微学报*, 2019, 38(2): 112-117.
WANG L J, LIU J B, ZHAO W X, *et al.* Design of a high power density micro-focus spot X-ray source focusing system [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2019, 38(2): 112-117. (in Chinese)
- [29] TUGGLE D W, SWANSON L W. Emission characteristics of the ZrO/W thermal field electron source [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1985, 3(1): 220-223.

作者简介:



赵伟霞(1989—),女,河北邯郸人,博士研究生,助理研究员,2012年于燕山大学获得学士学位,2015年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事电子束检测与多束技术方面的研究。
E-mail: zhaowx@mail. iee. ac. cn

通讯作者:



刘俊标(1974—),男,福建莆田人,博士,研究员,硕士生导师,中国科学院电工研究所微纳加工技术组组长,长期从事电子光学、微焦点射线源、电子束及应用等技术方面的研究。
E-mail: liujb@mail. iee. ac. cn

通讯作者:



张利新(1987—),男,辽宁凌海人,博士,副研究员,2020年于北京航空航天大学获得博士学位,2023年于中国科学院电工研究所博士后出站,主要从事电子光学系统设计及其应用技术的研
究。E-mail: zhanglx@mail. iee. ac. cn