

文章编号 1004-924X(2025)12-1876-13

微束斑 RHEED 类平行束电子枪设计

赵伟霞^{1,2}, 史丽娜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:针对高分辨率反射式高能电子衍射仪(RHEED)在微电子制造与表面分析领域的应用需求,而且长工作距离、微束斑、小束半角的电子枪是实现 RHEED 高分辨检测的关键核心部件,研制了微束斑的 RHEED 类平行束电子枪,分析了电子枪的电子光学系统特性,采用电子光学仿真软件仿真设计了低像差聚焦透镜;搭建了实验平台对研制的电子枪进行了束斑直径、束流和束半角性能测试与高定向热解石墨(HOPG)样品的衍射成像测试。实验结果表明:在工作距离 500 mm 下, RHEED 类平行束电子枪的束斑直径为 47.1 μm (加速电压 30 kV), 发射束流与束半角分别为 144.96 μA , 0.289 mrad (加速电压 15 kV), 在 HOPG 样品上获得了清晰的强度与晶体结构因子相对应的衍射斑点。

关键词:电子光学;反射式高能电子衍射;电子枪;类平行电子束

中图分类号: TN16 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253312.1876 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253312.1876

Design of a quasi-parallel beam electron gun with micro beam spot for Reflection High Energy Electron Diffraction

ZHAO Weixia^{1,2}, SHI Lina¹, 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: liujb@mail.iecee.ac.cn; lihan@mail.iecee.ac.cn

Abstract: In response to the application requirements of high-resolution Reflection High-Energy Electron Diffraction (RHEED) in the fields of microelectronics manufacturing and surface analysis, and considering that a long working distance, micro-beam spot size, and small beam half-angle electron gun are key components for achieving high-resolution RHEED detection, a micro-beam spot RHEED quasi-parallel beam electron gun was developed. The characteristics of the electron gun's electron optical system were analyzed, and a low-aberration focusing magnetic lens was designed utilizing electron optical simulation software. An experimental platform was set up to measuring the beam spot diameter, beam current, and beam half-angle performance of the developed electron gun, as well as to conduct diffraction imaging tests on highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) samples. The experimental results show that at a working

收稿日期: 2025-03-10; 修订日期: 2025-05-15.

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目 (No. PTYQ2024BJ0004)

distance of 500 mm, the beam spot diameter of the RHEED quasi-parallel beam electron gun is $47.1\text{ }\mu\text{m}$ (at an acceleration voltage of 30 kV), The emission current and the beam half-angle are $144.96\text{ }\mu\text{A}$ and 0.289 mrad respectively (at an acceleration voltage of 15 kV). Clear diffraction spots which intensity corresponding to the crystal structure factors were obtained on the HOPG sample.

Key words: electron optics; Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED); electron gun; quasi-parallel electron beam

1 引 言

在现代半导体器件、光电子器件、量子器件等微电子制造领域,纳米级半导体材料质量的精确控制至关重要,需要对生长过程进行原位实时监测^[1-3]。反射式高能电子衍射仪(Reflection High Energy Electron Diffraction, RHEED)利用准直的类平行电子束,以极小的角度掠射到材料表面,获得前散射的衍射斑点,通过衍射斑点可分析薄膜厚度、组分以及晶体生长机制等重要信息^[4]。由于电子束透入材料仅 1~2 个原子层深度,对材料表面结构与形态具有高灵敏度,可以实现原子级的原位测量,RHEED 成为表面结构分析领域尤其是薄膜物理领域极其重要的分析方法,是分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)、脉冲激光沉积(Pulsed Laser Deposition, PLD)、化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)等薄膜制备系统中必不可少的关键部件^[5-6]。RHEED 的关键参数为分辨率,决定着衍射图案信息和定量分析的精度。高分辨率可以更详细地观察表面特征、原子尺度信息和生长动力学,提高定量测量的准确性,对于促进表面科学研究、提高表面技术性能十分重要^[7]。RHEED 电子枪可发射小束半角的类平行电子束,其发射角影响电子入射材料的角度,束斑大小影响着材料表面分析区域的大小,两者共同决定了 RHEED 系统的分辨率。随着微电子制造和表面分析领域的发展,样品尺寸在不断增加,加大了电子枪的工作距离;器件特征结构不断缩小,微区表面特征的定量分析要求电子枪具备微束斑。束斑与工作距离相互限制,在长工作距离下实现微束斑的类平行束电子枪是 RHEED 系统提高分辨率的关键核心部件,也是技术难点。

RHEED 电子枪由 Nishikawa 于 1928 年首先

研制^[8],之后主要围绕衍射斑点探测与分析技术,根据应用领域的扩展逐渐发展出扫描电镜型(Scanning Reflection Electron Microscopy, SREM)^[9]、斑点分析型(Spot Profile Analysis, SPA^[10])、能量过滤型(Energy Filtering, EF^[11])、能量损失谱型(Energy Loss Spectroscopy, ELS^[12])、时间分辨型(Time-Resolved, TR^[13])、小束流型 PICO^[14]等多种 RHEED,用于满足不同材料与器件的特定需求。目前 RHEED 电子枪国外厂商有美国 SVTA^[15]、德国 STAIB^[16]、德国 Scienta Omicron^[17]和日本 R-DEC^[18],其加速电压 30~60 kV,在 150 mm 工作距离下束斑为 $50\text{ }\mu\text{m}$,发射束流 80~300 μA ,长工作距离下(300~1 000 mm)束斑直径 90~1 000 μm 。国内对 RHEED 电子枪的研究报道较少,段虞贵等^[19]、雷震霖等^[20]、游燕等^[21]等介绍了用于 MBE 或高压强环境下的自研 RHEED 电子枪,但束斑直径未优于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。国内厂商有大连齐维^[22],其加速电压 30 kV,束流 160 μA ,束斑直径 $100\text{ }\mu\text{m}$,工作距离 240 mm,性能参数与国外设备存在差距。目前国内有关 RHEED 的研究主要集中在应用领域,即晶体、薄膜生长工艺的研究^[23-24]。研制高性能 RHEED 电子枪,实现长工作距离下微束斑的类平行束,提高 RHEED 系统分辨率性能,不仅有助于我国科学仪器设备的自主创新,也有利于我国薄膜材料的研究与表面科学领域的进展。

本文针对微电子制造领域和表面分析领域对高分辨率 RHEED 系统的需求,研制长工作距离下微束斑直径的 RHEED 类平行束电子枪,目标性能为工作距离 500 mm 下,束斑优于 $100\text{ }\mu\text{m}$,束半角优于 0.5 mrad 。对 RHEED 分辨率的电子束影响因素进行研究,对长工作距离、微束斑、小束半角的电子光学系统特性进行分析,对聚焦透镜和 RHEED 电子枪进行仿真设计,并对电子枪的束斑、束流、束半角等性能参数进行实

验,为高性能 RHEED 系统及类平行束电子枪的研制提供技术基础。

2 系统分析与设计

2.1 工作原理与特性分析

RHEED 电子束与晶体产生衍射的条件满足布拉格定律, $2d \sin \theta = n\lambda$, 其中 d 为晶面间距, θ 为电子束与晶面的夹角, λ 为电子束波长。电子衍射要求电子束有较好的相干性,但由于实际的电子束具有能量分散与角度分散,影响了相干性条件,因此将满足相干性要求的波长有效长度称为电子束的相干长度,决定着 RHEED 分辨率^[5]。

当电子束能量分散时,导致了波数的分散 Δk :

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta E}{2E}, \quad (1)$$

其中: k 和 E 分别表示电子的平均波数和平均动能, $k = 2\pi/\lambda$ 。对于沿 x 方向传播且能量分散为 ΔE 的平面波 $\exp(ik_0x)$, 其波函数可表示为:

$$\frac{1}{\Delta k} \int_{k_0 - (\Delta k/2)}^{k_0 + (\Delta k/2)} \exp(ik_0x) dx = \frac{2\sin(\Delta kx/2)}{\Delta kx} \exp(ik_0x). \quad (2)$$

对于有限 Δk , 电子束波长的平行相干长度可通过 $\Delta kx_1/2 = \pi/2$ 和 $\Delta kx_2/2 = -\pi/2$ 计算得出:

$$L_{//1} = x_1 - x_2 = \frac{2\pi}{\Delta k} = \frac{2\lambda}{\Delta E/E}. \quad (3)$$

当电子源具有尺寸时,电子束无法被聚焦为完全平行,存在角度分散 $\Delta\theta$,影响电子束平行和垂直方向的相干性。垂直于电子束方向的波矢分散为 $\Delta k_{\perp} = k\Delta\theta$,垂直相干长度近似为 $L_{\perp} = \lambda/\Delta\theta$,平行于电子束方向的波矢分量为 $k_{//} = k \cos \theta_i$ (θ_i 为掠入射角),波矢分散为 $\Delta k_{//} = k \sin \theta_i \Delta\theta$ 。此时,平行相干长度为:

$$L_{//2} = \frac{2\pi}{\Delta k_{//}} = \frac{\lambda}{\sin \theta_i \Delta\theta}. \quad (4)$$

电子束能散和角度分散引起的总平行相干长度有^[5]:

$$\frac{1}{L_{//}^2} = \frac{1}{L_{//1}^2} + \frac{1}{L_{//2}^2}. \quad (5)$$

根据式(3)~式(5)得到电子束相干长度为:

$$L = \frac{2\lambda}{\sqrt{4(\Delta\theta)^2 \sin^2 \gamma + \left[(\Delta E/E)^2 + (2\sin \theta_i \Delta\theta)^2 \right] \cos^2 \gamma}}^{-1/2}, \quad (6)$$

其中: γ 为入射电子束与测量相干长度方向的夹角, $\Delta\theta$ 为束半角 α 的 2 倍, E 为加速电压 V 。可以看出,相干长度主要由电子束波长、能量分散和束半角决定。因此, RHEED 电子枪应具备以下特性:

(1) 波长小。波长越小,分辨率越高,同时越易发生衍射。 λ 有 $\lambda = 12.269(V + 0.978 \times 10^{-6}V^2)^{-1/2}$, 即电子枪加速电压决定了波长和电子衍射的条件,但过大会损坏样品。加速电压一般为 30 kV。

(2) 单色性好。RHEED 为热发射阴极,其电子能量一般呈麦克斯韦分布,能量分布曲线半高宽为: $\Delta E_k = 2.54k_B T$, k_B 为玻耳兹曼常数,其能量变化范围约在 0.3~0.6 eV。此外,要求电源高稳定、低纹波,避免产生电子束能量波动。

(3) 束半角小。束半角会影响入射角度,要求与材料表面平整度相当,对于 GaAs 为 0.25~0.5 mrad,对于 Si 更小,一般 $\alpha \leq 0.2$ mrad。此外,其他参数性能也影响了电子枪在 RHEED 的实际应用,主要有:

(1) 束斑直径小。小束斑直径可对样品微区检测,直接影响检测区域的分辨率。束斑直径一般 $< 100 \mu\text{m}$ 。

(2) 束流大。束流与束斑相结合,决定衍射斑点强度,衍射斑点强度大,探测信号高。电子枪发射束流一般在 100~300 μA 。

(3) 工作距离长。电子枪集成于薄膜制备系统中,因系统结构限制,与样品、荧光屏相距较远。工作距离一般为 150~500 mm。

可见, RHEED 电子枪的关键性能为长工作距离下实现大束流、微束斑的类平行电子束,其工作原理如图 1 所示。

图 1(a) 是 RHEED 电子枪结构图,包括三极钨灯丝电子枪、聚焦透镜、偏转器三个部分,电子束从阴极发射,能量可在 0.2~35 kV 范围调节,之后进入聚焦系统进行准直,经过 500 μm 光阑限束后进入偏转器,通过调整偏转器电流,电子

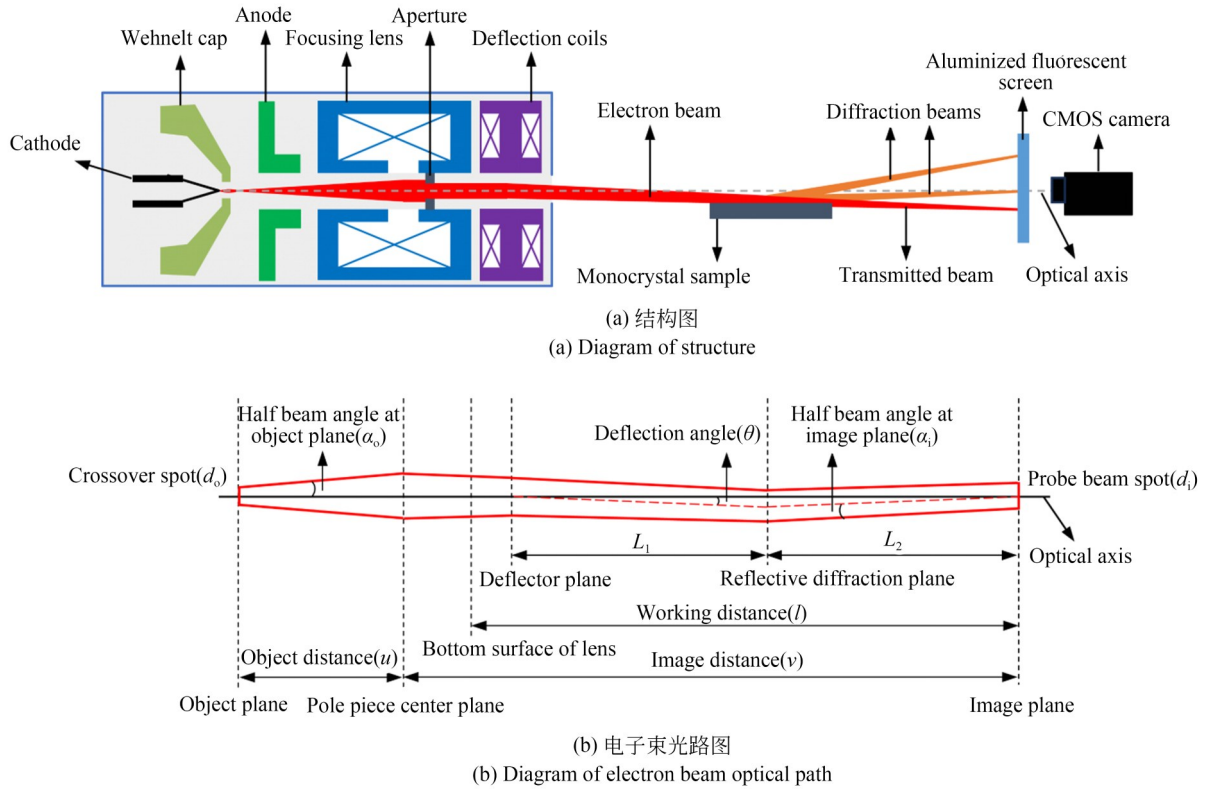


图 1 RHEED 电子枪工作原理

Fig. 1 Working principle of the RHEED electron gun

束以偏转角度 θ 掠射入样品表面并反射,产生的衍射和透射斑点最终达到荧光屏,最后由 CMOS 相机采集图像进行分析。图 1(b) 是电子枪的电子束光路图,阴极发射电子在阴极前方几毫米处形成交叉斑,其直径为 d_o ,物方束半角为 α_o ,透镜极靴中心平面与交叉斑之间的距离为物距 u 。电子束最终聚焦至荧光屏上,此时样品束斑直径为 d_i ,像方束半角为 α_i 。由于 θ 值很小 ($< 5^\circ$)^[23],电子束偏转并反射后的运动行程有 $L_\theta = L_1 \cos \theta + L_2 \cos \theta \approx L_1 + L_2$,其中 L_1 为偏转器中心平面到样品衍射点的距离, L_2 是样品衍射点到荧光屏的距离。像距 v 可定义为聚焦平面与荧光屏的距离,极靴下端到荧光屏的距离为工作距离 l 。

由于 RHEED 电子枪像方束半角较小 ($< 0.2 \text{ mrad}$),透镜的衍射像差不能忽略,根据 Barth-Kruit 束斑公式^[25],RHEED 电子枪像方 FW50(50% 束流)束斑直径 d_i 表示为:

$$d_i = \sqrt{\left[d_g^{1.3} + (d_\lambda^4 + d_s^4)^{1.3/4} \right]^{2/1.3} + d_c^2}, \quad (7)$$

$$d_g = M d_o, \quad (8)$$

$$d_\lambda = 0.54 \frac{\lambda}{\alpha_i}, \quad (9)$$

$$d_s = 0.18 C_s \alpha_i^3, \quad (10)$$

$$d_c = 0.34 C_c \alpha_i \frac{dV}{V_i}, \quad (11)$$

其中: d_g 为像平面处的高斯束斑直径, d_λ 是衍射弥散斑, d_s 为球差, d_c 为色差, M 为透镜放大倍率,有 $M = v/u$, 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,可分别表示为^[26]:

$$C_s = C_{s0}(1 + M)^4, \quad (12)$$

$$C_c = C_{c0}(1 + M)^2, \quad (13)$$

其中, C_{s0} , C_{c0} 分别为物方球差系数与物方色差系数。由式(7)可以看出,电子光学设计中应综合控制各像差分量对像平面束斑直径的影响,使得总体像差最小化,但 RHEED 电子枪的长工作距离导致像距 v 远大于物距 u ,因此放大倍率 M 较大,系统呈放大成像,根据式(8), d_g 将变大,同时根据式(12)和式(13), C_s 和 C_c 将迅速增大,造成 d_s , d_c 增加,进一步增大了 d_i 。因此 RHEED 电子

枪的设计重点是低像差聚焦透镜,并优化减小阴极交叉斑直径 d_0 ,控制放大倍率 M ,在满足长工作距离的同时,实现微束斑的类平行束。

2.2 低像差聚焦透镜的设计

RHEED 电子枪一般结构较为紧凑,本文选择对称透镜,以减小透镜尺寸。对称透镜以上下极靴间距 S 和极靴平均直径 D 为透镜的几何参量,对于磁透镜,一般以工作距离 l 与球差系数 C_s 之比 l/C_s 表征透镜性能, l/C_s 越大,代表透镜像差越小。透镜 S/D 比值的选取影响着 l/C_s ,其对透镜性能的影响程度与透镜激励参数有关。透镜的激励参数定义为加速电压 V_r 与透镜激励平方之比 $V_r/(NI)^2$,其中 N 为透镜线圈匝数, I 为透镜线圈电流。当 $V_r/(NI)^2 < 0.03$ 时, S/D 对 l/C_s 的影响较大,随着 $V_r/(NI)^2$ 的增大,在 $V_r/(NI)^2 > 0.03$ 后, S/D 的变化几乎不会影响

到 l/C_s ^[27]。对于 RHEED 电子枪,电子束通过聚焦透镜后会聚为类平行电子束,此时透镜焦点位于阴极交叉斑附近,透镜焦距与物距相近。磁透镜的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^[28]。可以看出,透镜焦距越小,其球差与色差系数也越小。但焦距减小,意味着物距同步减小。RHEED 工作距离长,物距减小,根据式(8), M 增加,根据式(12)和式(13), C_s 和 C_c 迅速增加,最终造成样品束斑变大,因此聚焦透镜需要综合像差、放大倍率等因素进行设计。

由于透镜位置与透镜焦距、放大倍率密切相关,本文基于 Munro's Electron Beam Simulation (MEBS)软件对聚焦透镜位置对电子枪性能的影响进行仿真,加速电压为 30 kV,聚焦透镜的工作距离为 500 mm,令极靴间隙中心与阴极的距离在 50~100 mm 范围内变化,结果如表 1 所示。

表 1 不同透镜位置下的 RHEED 磁透镜性能

Tab. 1 Performance of RHEED magnetic lens at different lens positions

Lens position/mm	M	$d_g/\mu\text{m}$	$d_s/\mu\text{m}$	$d_c/\mu\text{m}$	$d_\lambda/\mu\text{m}$	$d_i/\mu\text{m}$	α_o/mrad
50	-10.76	81.45	0.025	0.007	0.019	81.46	2.15
60	-8.90	67.33	0.021	0.006	0.019	67.33	1.78
70	-7.58	57.37	0.018	0.005	0.019	57.37	1.52
80	-6.60	49.98	0.016	0.004	0.019	49.98	1.32
90	-5.85	44.27	0.014	0.004	0.019	44.27	1.17
100	-5.25	39.73	0.013	0.004	0.019	39.73	1.05

可以看出,RHEED 电子枪的样品束斑主要由高斯斑决定,透镜距离电子枪越远,放大倍率越小,由式(8)可知样品束斑越小,但同时对应的物方束半角也会降低,这意味着到达样品表面的电子束有效束流会下降,造成衍射斑的信噪比降低。因此透镜位置的选择需要综合考虑。本文针对 100 μm 束斑直径的性能指标,综合考虑样

品束流与机械结构,选择透镜极靴间隙中心位置为 81.5 mm。

由上述分析可知,RHEED 电子枪聚焦透镜的激励参数 $V_r/(NI)^2 > 0.1$,为弱聚焦透镜,此时 S/D 对 l/C_s 的影响可以忽略。在透镜位置 81.5 mm 时,基于 MEBS 选择不同的 S/D 结构进行透镜性能计算,结果如表 2 所示,可以看出 S/D

表 2 不同 S/D 下的 RHEED 磁透镜性能

Tab. 2 Performance of RHEED magnetic lens at different S/D

S/D	Lens current/A	$d_g/\mu\text{m}$	$d_s/\mu\text{m}$	$d_c/\mu\text{m}$	$d_\lambda/\mu\text{m}$	$d_i/\mu\text{m}$	α_o/mrad
0.3	523.58	44.83	0.012	0.004	0.019	44.83	1.29
0.4	492.79	44.83	0.016	0.004	0.019	44.83	1.29
0.5	448.04	44.83	0.022	0.004	0.019	44.83	1.29
0.6	417.15	44.84	0.029	0.004	0.019	44.84	1.29
0.7	394.65	44.85	0.037	0.004	0.019	44.85	1.29

的变化对透镜性能影响较小。结合透镜机械安装与真空密封需求,确定透镜极靴最终结构尺寸为 $S/D=0.4, S=6\text{ mm}, D=15\text{ mm}$ 。

最终透镜结构如图 2 所示,极靴间隙位于透镜下方,不影响透镜性能的同时,使得电子枪结构较为紧凑,方便减小尺寸;透镜极靴内孔空间方便安装光通道管及光阑组件,以实现真空密封与孔径角约束。

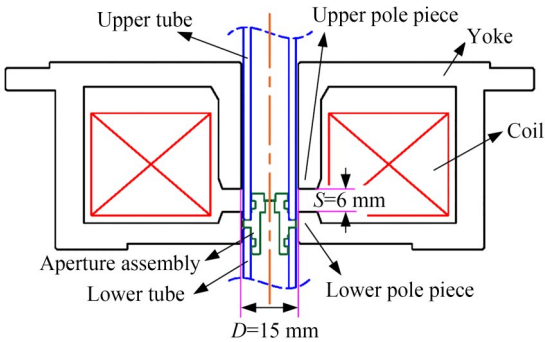


图 2 聚焦透镜结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of the magnetic lens

2.3 长工作距离微束斑类平行束电子枪的设计

在热发射电子枪中,阴极高度(阴极尖端与栅极下端面间的距离)一般与栅极内孔半径相近,为获得微束斑的电子源,可适当增加阴极高度。本文采用尖端发射曲率为 0.12 mm 的钨灯

丝阴极,令栅极孔径为 1.4 mm ,阴极高度为 1.5 mm 。设置加速电压在 $10\sim30\text{ kV}$ 范围内变化,透镜极靴中心位于 81.5 mm 处,工作距离为 500 mm ,光阑孔径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。基于 MEBS 仿真软件对 RHEED 电子枪的性能进行计算,建立的电子枪仿真模型与电子束运动轨迹如图 3 所示,其中 ML_1 为聚焦透镜。

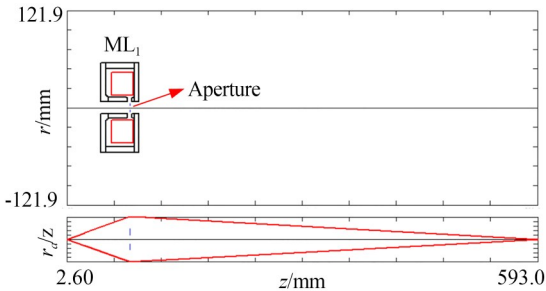


图 3 RHEED 电子枪仿真结构与电子束轨迹
Fig. 3 Simulated structure of the RHEED electron gun and the electron beam trajectory

在不同加速电压下,仿真得到的电子枪束斑直径、束流、束半角等各项性能参数如表 3 所示。可以看出,在加速电压 $10\sim30\text{ kV}$ 范围内,样品束斑均优于 $70\text{ }\mu\text{m}$,在加速电压 30 kV 时样品束斑最小,为 $44.64\text{ }\mu\text{m}$ 。由于像方束半角较小,使得像差中衍射像差占比更高,样品束斑则主要受到高斯束斑的影响。

表 3 不同加速电压下的 RHEED 电子枪性能参数仿真结果

Tab. 3 Simulation results on the properties of RHEED electron gun with different accelerating voltages											
Accelerating voltages/kV	$d_o/\mu\text{m}$	Brightness $/ (10^5\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	Emission current/ μA	Lens cur- rent/At	α_o $/\text{mrad}$	d_g $/\mu\text{m}$	d_s $/\mu\text{m}$	d_c $/\mu\text{m}$	d_λ $/\mu\text{m}$	d_i $/\mu\text{m}$	
10	10.86	0.32	2.99	284.51	1.29	69.84	0.016	0.013	0.033	69.84	
15	9.25	0.82	5.5	348.06	1.29	59.55	0.016	0.008	0.027	59.55	
20	8.23	1.6	8.57	401.64	1.29	52.98	0.016	0.006	0.023	52.98	
25	7.64	2.5	11.62	448.82	1.29	49.18	0.016	0.005	0.021	49.19	
30	6.97	4.2	16.15	491.85	1.28	44.63	0.016	0.004	0.019	44.64	

3 实验验证

3.1 实验平台

基于仿真结果,搭建了 RHEED 电子枪样机与实验平台,其结构与实物如图 4 所示。

RHEED 电子枪主要包括三极式热发射电子枪、聚焦系统与偏转系统,其中三极式热发射电子枪包括钨灯丝阴极、栅极和阳极,聚焦系统包括对称式双极靴磁聚焦透镜、光通道与光阑组件,偏转系统为四极磁偏转器,可以实现电子束 x, y 方

向的偏转。整体电子枪通过波纹管组件安装至实验平台,通过调节波纹管长度,实现 500 mm 工作距离。实验平台包括 10 μm 钨丝组件、法拉第杯、Micronix PPX50 与 PZS90 精密位移台等组成的真空测试平台,高稳定高压电源、电流源等组成的电源系统,Keithley 6482 皮安表与高速采集

卡等组成的束流采集系统,低余辉荧光屏与 CMOS 相机等组成的图像采集系统,以及高压控制、位移控制、图像采集、束流采集等组成的上位机控制软件系统,其位移分辨率 50 nm,电流分辨率 10 fA,可以实现 RHEED 电子枪束斑直径、束流、束半角的测量。

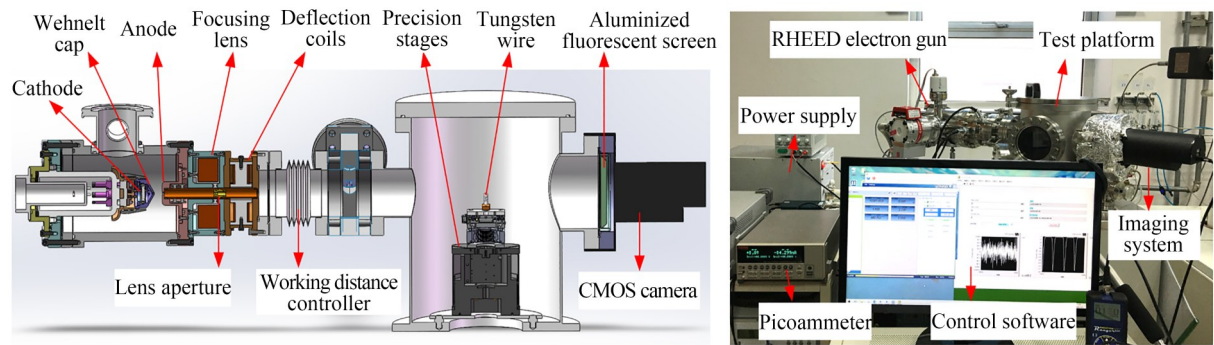


图 4 RHEED 电子枪实验平台结构图与实物图

Fig. 4 Internal structure and actual image of the experimental platform for RHEED electron gun

3.2 RHEED 电子枪束斑直径测试

RHEED 电子枪束斑的测量一般是通过荧光屏和 CMOS 相机进行束斑图像的采集,对采集束斑尺寸与图像尺寸占比进行计算获得,测量结果

耦合了荧光屏光电转换的误差。本文采用直接测试方法,可降低误差,提高测量精度。束斑直接测试的常用方法有钨丝法、狭缝法、刀口法等^[29],本文采用电子束扫描钨丝法,如图 5 所示,

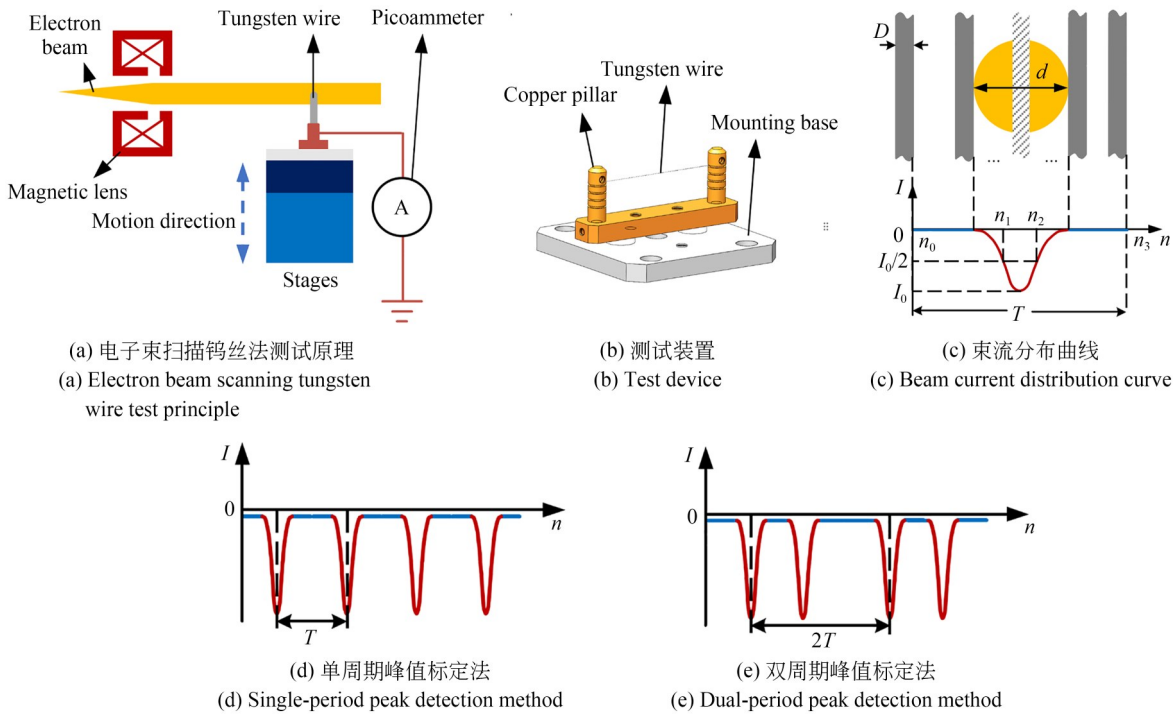


图 5 束斑测试原理

Fig. 5 Principle of spot measuring

其易于集成,精度较高,适用于微米量级束斑的测量。电子束扫描钨丝法测量束斑原理如图 5(a)所示,直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 钨丝与皮安表相连接,通过钨丝的电子束束流被皮安表以固定的时间间隔进行采集。测试结构如图 5(b)所示,钨丝悬挂于铜支柱上,长度为 20 mm ,有助于快速定位束斑。

令钨丝垂直上下做往返周期性运动,每个周期的时间为 T ,行程为 S ,在每个周期内钨丝切割一次电子束,未切割电子束时皮安表采集数值较小,约为零;切割电子束时,皮安表采集数值产生先增加后减小的变化,在束斑中心处达到峰值 I_0 ,最终形成周期性束流信号曲线,且近似为高斯分布,如图 5(c)所示。通过计算束流曲线的半高宽(FWHM)相对于位移台行程的占空比得到束斑的直径,束斑计算公式为:

$$d = S(n_2 - n_1) / (n_3 - n_0), \quad (14)$$

其中: n_0, n_3 分别为位移台运行周期的采样起始点与终止点, n_1, n_2 分别是束流曲线峰值半高宽($I_0/2$)对应的采样起始点与终止点。

在实际束斑测试中,位移台运行周期的采样起止点较难准确标定,因此可采用峰值标定法提取位移台周期信号 T ,可提高精度和效率,如图 5(d)所示。另外,位移台带动钨丝切割电子束过程中,束斑一般很难位于位移台行程正中心,使得采集到的束流波形呈现双峰值周期性束流信号,如图 5(e),无法通过峰值标定法标定单周期信号的起止点,此时可采用双周期峰值标定法标定两个位移周期的起止点,实际行程为 $S_{2T} = 2S$ 。

基于上述测试原理,采用双周期峰值标定方法对 RHEED 电子枪的束斑进行测试,令位移台周期运动行程为 $300\text{ }\mu\text{m}$,灯丝电流为 2.2 A ,加速电压以 1 kV 的步长在 $10\sim 30\text{ kV}$ 范围内变化,调节栅极电压与聚焦透镜电流,采样间隔时间 100 ms ,检测到的不同加速电压下的束流曲线如图 6 所示(为减小遮挡,图中未给出部分加速电压下的束流曲线)。

由图 6 可以看出,束流曲线出现了周期性微小抖动,抖动的位移周期为 $20\text{ }\mu\text{m}$,频率为 0.5 Hz 。采用 Renishaw XL80 激光干涉仪测量位移台位移精度,令位移台移动 3 mm ,步长为 $100\text{ }\mu\text{m}$,测量实际位置并与名义位置进行对比,得到

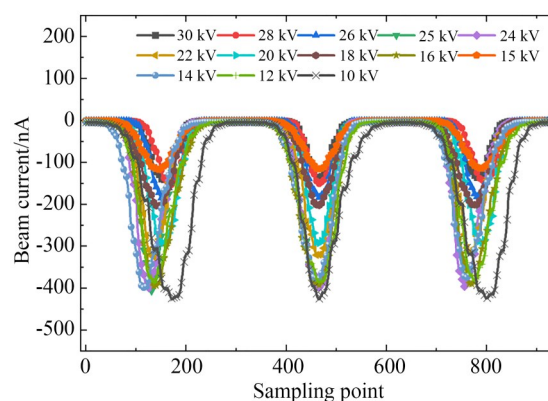


图 6 不同加速电压下的束流分布曲线

Fig. 6 Beam current distribution curves at different accelerating voltages

位移台不同位置下的位移误差如图 7 所示,其中绝对误差为实际位置与名义位置的差值,相对误差为两次测量间绝对误差的差值。可以看出移台误差呈现周期性分布,说明位移台在运动过程中存在周期性摆动,摆动的位移周期为 1 mm ,远大于束流抖动的位移周期。因此束流曲线中的低频微抖动并非由位移台引起,而可能源自高层实验室机械振动引起的电子束抖动,其对束流曲线整体分布影响较小,可通过拟合进一步消除其影响。

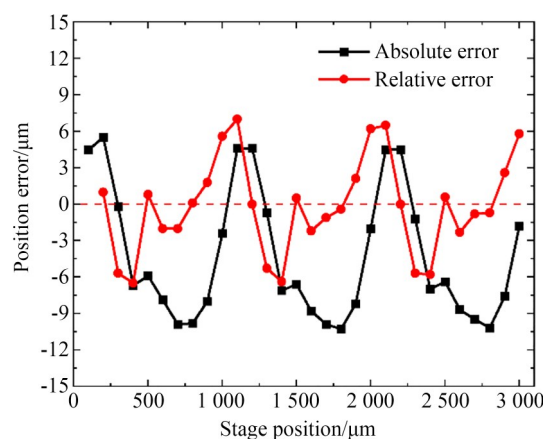


图 7 位移台不同位置下的位移误差

Fig. 7 Position error of the stage at different positions

由于热发射电子束束斑为高斯分布,采用高斯函数对束流数据进行拟合,可以提高束流半高宽的提取精度,减小测试误差。以 30 kV 下的束流曲线为例,拟合前后的束流曲线对比如图 8 所

示,可以看到拟合曲线的决定系数 $R^2 = 0.997$, 约化卡方 $\chi_R^2 = 4.883$, 拟合度较高, 拟合后的束流曲线消除了束流曲线的抖动。采用相同方法, 对不同加速电压下的束流曲线进行拟合, 提取束流分布的半高宽, 根据式(14)计算采集束流与拟合束流对应的束斑直径, 对比了束斑直径的仿真结果与实测结果, 结果如图9所示。

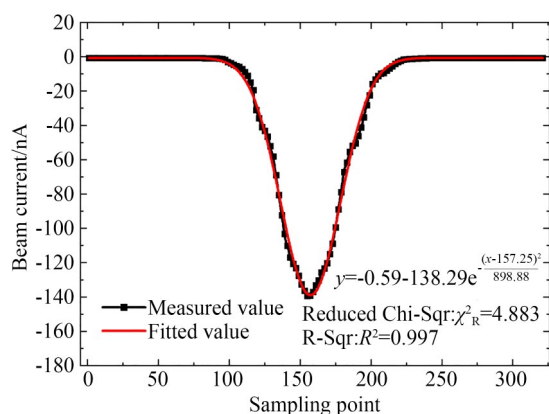


图8 30 kV加速电压下采集束流曲线的拟合

Fig. 8 Fitting of the acquired beam current curve at an accelerating voltage of 30 kV

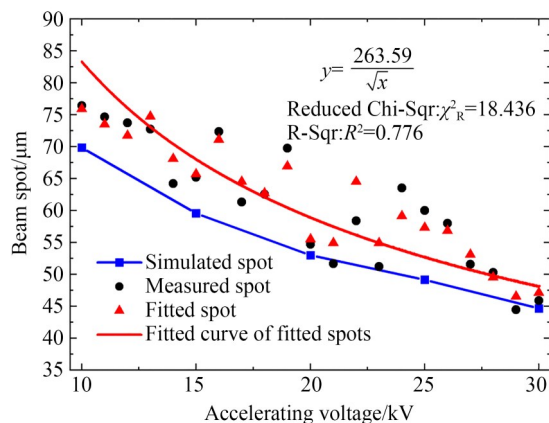


图9 不同加速电压下测得的束斑直径(FWHM)

Fig. 9 Spot diameter (FWHM) measured at different accelerating voltages

由图9可以看出,整体上束斑直径随加速电压增加而减小,实测束斑分布存在一定偏差;相比测试束斑,拟合束斑的离散程度下降,本文采用拟合束斑结果对电子枪束斑性能进行评估。理论简化下,束斑直径一般与加速电压的平方根成反比,即 $d \propto 1/\sqrt{V}$ 。因此,采用 $y = Ax^{-0.5}$ 函

数对拟合束斑进行拟合,得到拟合束斑随加速电压的变化曲线,其决定系数 $R^2 = 0.776$, 约化卡方 $\chi_R^2 = 18.436$, 存在一定拟合度误差,这是由于不同加速电压下电子束聚焦状态为手动调节,因此束斑分布较为离散,导致函数拟合精度不是很高,但不影响拟合束斑随加速电压的总体变化趋势。与仿真束斑对比,可以看出拟合束斑的变化趋势与仿真束斑基本一致。电子枪 10~30 kV 加速电压范围内的束斑均优于 $80 \mu\text{m}$, 在加速电压 30 kV 时束斑直径最小,为 $47.1 \mu\text{m}$ 。

3.3 RHEED 电子枪发射束流测试

电子枪发射束流一般采用高压电源采样电路进行检测,通过高压软件显示值进行读数。本文采用法拉第杯和皮安表进行直接测试。法拉第杯的深宽比为 8:1, 安装于位移台上,与皮安表连接。移除透镜光阑,调节聚焦电流,令电子束聚焦至荧光屏上,再通过位移台移动法拉第杯截获电子束,令电子束全部通过杯孔射入杯内,通过皮安表采集。为减小高能量、大束流的聚焦电子束对荧光屏的损伤,测试时采用的加速电压为 15 kV, 灯丝电流为 2.2 A, 不同栅极电压下接收到的电子枪发射束流如图10所示。可以看出,高压电源显示束流与实测束流相差不大,实测束流在 0~144.96 μA 的范围内变化,并随栅极电压的增加而减小,最终在 -450 V 时发射截止。发射束流随栅极电压的增加呈现近似指数变化的关系,这是由于栅极电压的增加会令阴极表面零电位的位置沿着阴极表面向光轴移动,使得阴极尖端表面的发射面积减小。

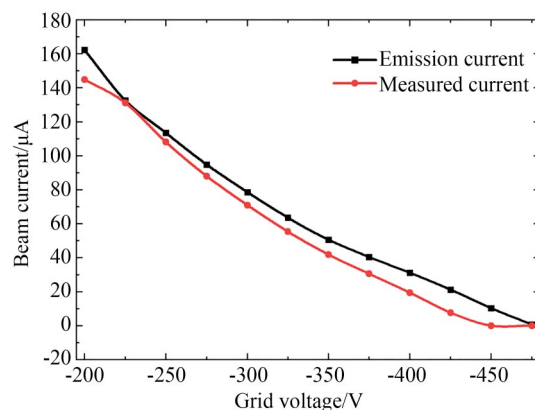


图10 发射束流随栅极电压的变化

Fig. 10 Emitted beam current variation with the grid voltage

3.4 RHEED 电子枪束半角测试

电子束束半角的测试原理如图 11 所示,采用图 5(a)所示的钨丝法,通过移动位移台,测量光轴上不同位置 z_n 处的电子束束斑直径 d_n ,基于几何关系计算得到电子束束半角大小,计算公式为:

$$\alpha_n=(d_n-d_1)/(z_n-z_1).$$
 (15)

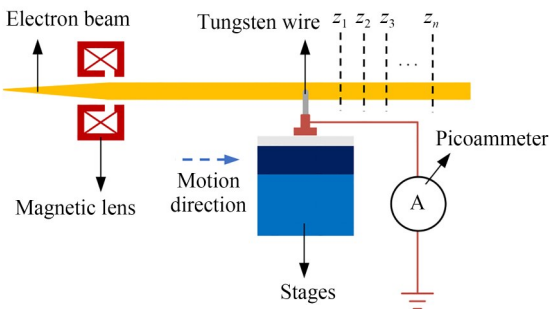


图 11 电子束束半角测试原理
Fig. 11 Principle of beam half-angle measuring

保持电子枪灯丝电流为 2.2 A,加速电压为 15 kV,调节聚焦透镜电流,令电子束聚焦于荧光屏上。位移台周期行程为 500 μm ,在行程范围内取 6 个采样点 $z_1\sim z_6$,从靠近电子枪一侧开始进行束斑测量,分别为 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm 和 25 mm,对应测得的束斑直径分别为 $d_1\sim d_6$,再根据式(15)计算得到束半角大小,结果如表 4 所示。可以看出,实测束半角在 0.172~0.387 mrad 变化,但理论上 6 个采样点计算得到的束半角应相同,这是由于测试结果中耦合了位移台的运动误差。为降低误差的影响,本文采用实测值的均值进行束半角表征,即 RHEED 电子枪束半角为 0.289 mrad。

表 4 不同位置的电子束束半角

Tab. 4 Electron beam half-angles at different positions

Sampling location/mm	$d_i/\mu\text{m}$	α_i/mrad
0	127.69	—
5	125.97	0.172
10	124.23	0.346
15	125.20	0.249
20	124.80	0.289
25	123.82	0.387
均值	—	0.289

3.5 RHEED 电子枪衍射成像实验

在完成电子枪电子束性能测试后,针对高定向热解石墨(Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)样品进行衍射成像实验。HOPG 是一种多晶材料,性能接近单晶石墨,同时尺寸大、平整度高,不需加热,适用于 RHEED 衍射成像测试^[30]。通过偏转器调整电子束的偏转,并旋转样品,使得电子束掠入射石墨样品。调整加速电压,获得的衍射斑点如图 12 所示。可以看出, HOPG 样品衍射条纹清晰,可以获得 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 入射方位角的零阶劳厄区中的倒易点和杆,且光斑强度与晶体结构因子成正比。

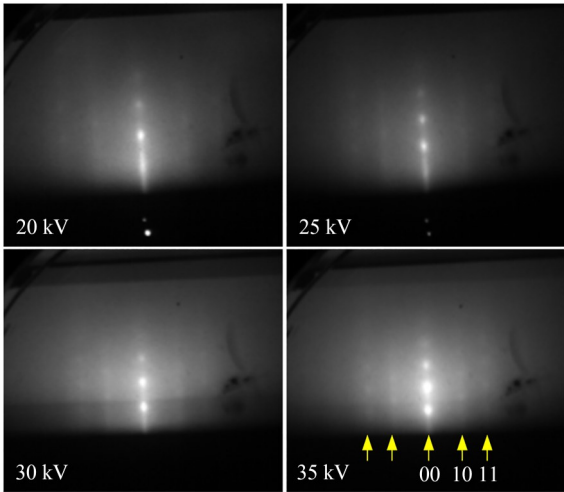


图 12 高定向热解石墨的 RHEED 衍射斑点
Fig. 12 RHEED pattern of the highly oriented pyrolytic graphite (HOPG)

4 结 论

本文针对微电子制造、表面分析科学领域对高分辨率 RHEED 的需求,研究了影响 RHEED 分辨率性能的电子束因素,确定了 RHEED 电子枪的关键性能为小束半角、微束斑、大电流、长工作距离,研制了长工作距离下微束斑的 RHEED 类平行束电子枪。通过电子光学理论分析了长工作距离下电子束束斑的主要影响因素,基于电子光学仿真软件对电子枪与聚焦透镜进行了仿真设计,详细介绍了电子束性能测试方法,并搭建了实验平台进行电子束束斑、束流、束半角测试与高定向热解石墨(HOPG)样品的衍射成像测试。最终在工作距离 500 mm 下,RHEED 类平

行束电子枪在 10~30 kV 加速电压范围内的束斑直径均优于 80 μm , 加速电压 30 kV 下获得最小束斑直径为 47.1 μm , 在加速电压 15 kV 下发射束流为 144.96 μA 、束半角为 0.289 mrad, HOPG 样品可获得清晰的强度与晶体结构因子相对应的衍射斑点, 达到了设计目标。本文给出了 RHEED 关键参数束斑和束半角的测试方法与结果, 束斑参数优于国内 RHEED 电子枪性能, 可提升 RHEED 系统的分辨率; 与国外工作距离 150 mm 下束斑 50 μm 的性能相比, 本文在保持束斑优于 50 μm 的同时使得工作距离扩大到 500 mm, 有利于大尺寸样品的高精度原位监测。本文为高性能 RHEED 系统及类平行束电子枪的研制提供了技术基础, 有助于我国科学仪器设备的自主创新和表面分析领域研究的进展。

本工作还存在需要改进的地方, 主要有: 由

于位移台运动精度问题导致束斑、束半角测试结果中耦合了一定误差, 需要对位移台的误差特性进一步进行分析, 对束流曲线进行校正, 或更换直线度性能更好的精密位移台, 获得更高精度的测试结果, 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: 调研, 测量方法提出, 方案设计, 测量实验及数据整理分析, 论文构思和撰写, 可视化呈现;

史丽娜: 测量实验及数据整理, 验证;

刘俊标: 测量方法提出, 方案设计与指导, 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, 方案指导, 论文审核。

参考文献:

- [1] 刘成有, 宁丹, B. P. ZHANG, 等. ZnO 薄膜非线性光学特性的实验研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 265-271.
LIU C Y, NING D, B. P. ZHANG, *et al.* Nonlinear optical properties of ZnO films deposited by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 265-271. (in Chinese)
- [2] 刘林生, 刘肃, 王文新, 等. GaAs(110)量子阱材料生长和光学特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 678-683.
LIU L S, LIU S, WANG W X, *et al.* Optical properties and material growth of GaAs(110) quantum wells[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 678-683. (in Chinese)
- [3] 焦宏飞, 汲小川, 张锦龙, 等. 高光谱性能光学薄膜研究进展[J]. 光学精密工程, 2022, 30(21): 2591-2607.
JIAO H F, JI X C, ZHANG J L, *et al.* Research progress of advanced high-spectral-performance optical coatings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(21): 2591-2607. (in Chinese)
- [4] 李美成, 王禄, 熊敏, 等. 分子束外延 InAs 量子点的 RHEED 实时原位分析[J]. 微纳电子技术, 2008, 45(8): 470-475, 479.
LI M C, WANG L, XIONG M, *et al.* In-situ diagnosis of InAs quantum dots fabricated by MBE using RHEED [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2008, 45(8): 470-475, 479. (in Chinese)
- [5] HASEGAWA S. *Reflection High-Energy Electron Diffraction* [M]. HASEGAWA S. Characterization of Materials, 2012: 1-14.
- [6] VAN GORKUM A A, SMITS M R T, LARSEN P K, *et al.* High-brightness and high-resolution RHEED system [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1989, 60(9): 2940-2944.
- [7] ICHIMIYA A, I. COHEN P. *Reflection High Energy Electron Diffraction* [M]. Cambridge; Cambridge University Press. 2004: 3-17.
- [8] PRICE G L. *Reflection High Energy Electron Diffraction* [M]. Surface Analysis Methods in Materials Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992: 263-274.
- [9] ICHIKAWA M, DOI T. Observation of Si(111) surface topography changes during Si molecular beam epitaxial growth using microprobe reflection high-energy electron diffraction[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 50(17): 1141-1143.
- [10] MÜLLER B, HENZLER M. SPA-RHEED: a novel method in reflection high-energy electron diffraction with extremely high angular and energy resolution [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(11): 5232-5235.
- [11] HORIO Y, HASHIMOTO Y, SHIBA K, *et al.*

- Development of energy-filtered reflection high-energy electron diffraction apparatus[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34(10R): 5869.
- [12] BRAUN W, DÄWERITZ L, PLOOG K H. New model for reflection high-energy electron diffraction intensity oscillations[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1998, 16(4): 2404-2412.
- [13] PARK H, POUNDS T D, ZUO J M. Development of time resolved reflection high-energy electron diffraction system to study ultrafast phases transition at surfaces[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2008, 14(S2): 502-503.
- [14] CoR-DEC. Ltd. Pico-Rheed [EB/OL] (2019-10-22), [2025-03-07]. <https://rdec.co.jp.htm>.
- [15] AssociatesSVT. RHEED-MBE-Equipment [EB/OL] (2019-10-22), [2025-03-07]. <https://www.svta.com.htm>.
- [16] STAIB INSTRUMENTS. Reflection High Energy Electron Diffraction [EB/OL] (2019-10-22), [2025-03-07]. <https://www.staibinstruments.com.htm>.
- [17] OmicronScienta. RHEED [EB/OL] (2019-10-22), [2025-03-07]. <https://scientaomicron.com.htm>.
- [18] CoR-DEC. Ltd. RHEED [EB/OL] (2019-10-22), [2025-03-07]. <https://rdec.co.jp.htm>.
- [19] 段虞贵, 蒋仲湘, 唐克华. 用于分子束外延的反射式高能电子衍射仪[J]. *微细加工技术*, 1984(2): 57-59.
- DUAN Y G, JIANG Z X, TANG K H. Reflective high energy electron diffractometer for molecular beam epitaxy[J]. *Microfabrication Technology*, 1984(2): 57-59. (in Chinese)
- [20] 雷震霖, 杨乃恒, 于卓, 等. 高压强下外延生长的差分RHEED原位监测[J]. *真空科学与技术*, 1998, 18(6): 470-474.
- LEI Z L, YANG N H, YU Z, *et al.* In situ monitoring of epitaxy growth by differential RHEED under high pressure[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1998, 18(6): 470-474. (in Chinese)
- [21] 游燕, 臧侃, 郭方准. 国产高能量电子枪的研发[J]. *物理*, 2015, 44(11): 761-765.
- YOU Y, ZANG K, GUO F Z. Development of domestic high energy electron Gun[J]. *Physics*, 2015, 44(11): 761-765. (in Chinese)
- [22] 大连齐维科技. RHEED电子枪[EB/OL] (2019-10-22), [2025-03-07]. <https://www.chi-vac.com.htm>.
- CHI-VAC Research & Development Co. Ltd. RHEED Electron Gun [EB/OL] (2019-10-22), [2025-03-07]. <https://www.chi-vac.com.htm>. (in Chinese)
- [23] 王兆阳, 胡礼中. RHEED在计算 Al_2O_3 晶面间距中的应用[J]. *半导体技术*, 2009, 34(1): 73-75.
- WANG Z Y, HU L Z. Application of RHEED in the calculation of Al_2O_3 interplanar distance [J]. *Semiconductor Technology*, 2009, 34(1): 73-75. (in Chinese)
- [24] 房丹, 张强, 李含, 等. 反射高能电子衍射优化GaSb薄膜生长的工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 231603.
- FANG D, ZHANG Q, LI H, *et al.* Reflected high energy electron diffraction optimizing GaSb film growth process[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 231603. (in Chinese)
- [25] 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 Processing, Measurement, and Phenomena*, 2008, 26(3): 949-955.
- [26] 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)
- [27] 史丽娜, 刘俊标, 牛耕, 等. 棒阳极X射线源聚焦系统的电子光学设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2234001.
- SHI L N, LIU J B, NIU G, *et al.* Electro-optical design of focusing system for rod-anode X-ray sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22): 2234001. (in Chinese)
- [28] ORLOFF J. *Handbook of Charged Particle Optics, Second Edition* [M]. Handbook of charged particle optics, 2008.
- [29] WEI X Z, JUN B L, GENG N, *et al.* Research

on the electron beam spot detection methods based on SEM[C]. *Eighth International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology (AOMATT2016)*, Suzhou, China, 2016.

[30] HORIO Y, YAMAZAKI R, YUHARA J, *et al.* Behavior of wave field on graphite surface observed using reflection high-energy electron diffraction technique [J]. *E-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 2018, 16: 88-92.

作者简介:



赵伟霞(1989—),女,河北邯郸人,助理研究员,中国科学院大学博士研究生,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:



韩立(1970—),男,山西壶关人,博士,研究员,博士生导师,就职于中国科学院电工研究所,长期从事微米/纳米加工和测量、电子束曝光设备的研制和高压电子束曝光特性的研究。E-mail: lihan@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,就职于中国科学院电工研究所,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