

加速器-电镜联机的离子光路及其调整方案

叶小舟, 杨 铮, 周 霖, 欧阳中亮, 黎 明, 刘传胜, 郭立平, 任 峰, 蒋昌忠, 付德君*

(武汉大学 物理学院 加速器实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 离子辐照引起的材料微结构变化是一个复杂的过程, 用加速器-电镜联机装置可原位观察载能离子束辐照引起的材料微结构演变。武汉大学加速器-电镜联机装置由1台 2×1.7 MV 串列加速器、1台200 kV 离子注入机和1台200 kV 透射电镜组成, 通过自行设计的传输系统实现联机。本文介绍联机装置的光路布局, 给出了静电加速器离子动力学计算程序 LEADS (linear and electrostatic accelerator dynamics simulation) 优化计算的结果, 提出了两种改进方案, 并用 LEADS 对改造后的加速器-电镜联机中离子运动进行了计算。结果显示, 调整现光路二单元四极透镜的同时, 在200 kV 注入机 90° 偏转磁铁至电镜之间增加1个二单元静电四极透镜, 将提高该系统中离子束传输效率。

关键词: 加速器; 离子注入机; 透射电镜; 联机; 离子光路

中图分类号: TL505

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0276-05

Optics Calculation and Beam Line Design for Accelerator-TEM Interface

YE Xiao-zhou, YANG Zheng, ZHOU Lin, OUYANG Zhong-liang, LI Ming,
LIU Chuan-sheng, GUO Li-ping, REN Feng, JIANG Chang-zhong, FU De-jun*

(Accelerator Laboratory, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Accelerator-transmission electron microscopy (TEM) interface facility is a useful tool for the study of materials because of its in situ observation function that is applicable to the complex evolution of microstructures during ion irradiation. The first accelerator-TEM interface system in China has been established at Wuhan University, which consists of a Hitachi H800 TEM, a 200 kV ion implanter and a 2×1.7 MV tandem accelerator. The paper gives the layout of the equipment and ion optical calculation results which provide possible adjustment of the system to improve its performance. The calculation result suggests that transport efficiency of the ion beam can be enhanced by adding another duality electrostatic quadruple in company with adjusting the original magnetic quadrupoles.

Key words: accelerator; implanter; transmission electron microscopy; interface system; beam line

收稿日期: 2008-07-03; 修回日期: 2008-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10435060, 10675095)

作者简介: 叶小舟(1984—), 女(回族), 安徽桐城人, 硕士研究生, 凝聚态专业

* 通信作者: 付德君, E-mail: djfu@whu.edu.cn, 电话: 027-68753587

载能离子与物质的相互作用主要是固体中的原子碰撞和能量损失过程,其主要特点是载能离子在短时间内与固体相互作用,在材料的表面沉积大量能量,将固体中的部分物质驱动到远离平衡态。随后,这部分具有高能量的原子组态以高达 10^{14} K/s 的冷却速率向平衡态弛豫。因此,离子束与固体的相互作用可获得常规合成方法所不能得到的一些亚稳态材料。但离子束辐照引起的材料成分、原子环境和电子组态及结构变化会导致材料性能的改变、缺陷的产生和积累甚至半导体器件的失效。另外,由于载能离子束与固体作用时间短、反应激烈、对环境敏感,注入离子的种类、能量、剂量、靶材料、温度、弛豫时间等因素对结果影响很大^[1-2]。因此,随着离子束技术的广泛应用和人们对离子束与固体相互作用认识的深入,一些可以在不同条件下及时测量动态数据从而获得离子束轰击固体过程中产生的中间态和快速过程信息的方法和一些能够对离子束和固体相互作用过程进行原位观测的实验手段对更细致的研究是必要的。1978年,第1台可现场直接获取离子轰击材料微结构变化以及短寿命中间态和快速过程动态信息,用于探索载能离子与固体相互作用基本规律的加速器-电镜联机系统在东京大学建成。此后,许多国家建立了类似的联机装置^[3-4]。本文针对我国第1台加速器-电镜联机装置在运行中存在的一些问题,采用北京大学开发的静电加速器离子动力学计算程序(LEADS)^[5]对离子动力学进行优化并对系统进行调整。

1 系统介绍

图1示出了武汉大学加速器-电镜联机系统的光路布局图。 2×1.7 MV 串列加速器引出的离子束通过磁开关进入联机管道后到达电镜,而 200 kV 离子注入机产生的能量较低的离子束可通过开关磁铁偏转进入联机管道后到达电镜进行原位实验。从串列加速器离子源到开关磁铁入口的束流传输总路程为 5.8 m,从开关磁铁出口到电镜样品室的距离为 12.4 m,从偏转磁铁到电镜样品室的距离为 9.4 m,串列加速器-透射电镜联机线总长 27.6 m。该系统改造前,从氮离子注入机到达电镜室的离子

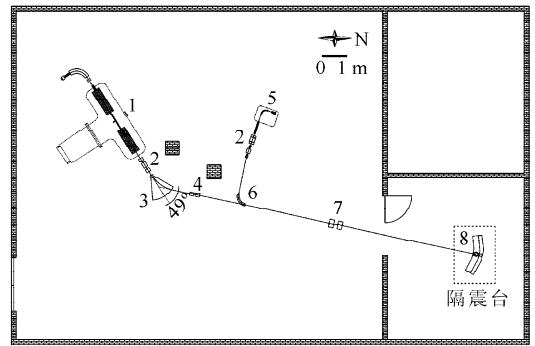


图1 加速器-电镜联机光路布局图

Fig. 1 Scheme of accelerator-TEM interface facility

- 1——串列加速器;2——三单元静电四极透镜;
3——开关磁铁;4——二单元静电四极透镜;
5——离子注入机;6——偏转磁铁;
7——二单元磁四极透镜;8——透射电子显微镜

束流经优化可达 180 nA^[6]。为进一步提高进入电镜室的束流强度,针对该系统存在的问题进行了新的 LEADS 计算,并提出了具体的系统改造方案。

1.1 1.7 MV 串列加速器

系统所用串列加速器是美国通用离子公司的 2×1.7 MV 串列加速器,该加速器于 2004 年由中国科学院物理研究所调拨至武汉大学。该加速器采用铯溅射负离子源,由吸极电压引出的负离子束经过单透镜初聚焦后进入 2 个 45° 分析磁铁进行偏转分析,之后,负离子再依次经过静电对中、单透镜后进入加速管。加速管中间段电荷剥离气体为高纯氮气。在加速管高能端出口外,安装有 1 组三单元静电四极透镜,离子束被聚焦后经过开关磁铁进入联机管道,质子进入 RBS 靶室的束流可达到 5 nA。 2×1.7 MV 串列加速器内部结构示于图 2。

1.2 200 kV 离子注入机

系统所用离子注入机为国产 200 kV 注入机(图 3),离子源为冷阴极潘宁型离子源,改进后可增加金属靶,使得此离子源既可引出气体离子,也可引出金属离子。离子源吸极电压为 $0 \sim 20$ kV。离子束引出后,经过单透镜初聚焦,依次通过光阑、合轴偏转、抑制电极和可变光阑,进入双向聚焦磁分析器(两端均有磁屏蔽盒),再经过 90° 偏转,进入由 3 个双圆筒加速管串联而成的加速管,加速电压 $0 \sim 200$ kV。离子束经三单元静电四极透镜聚焦、 xy 扫描进

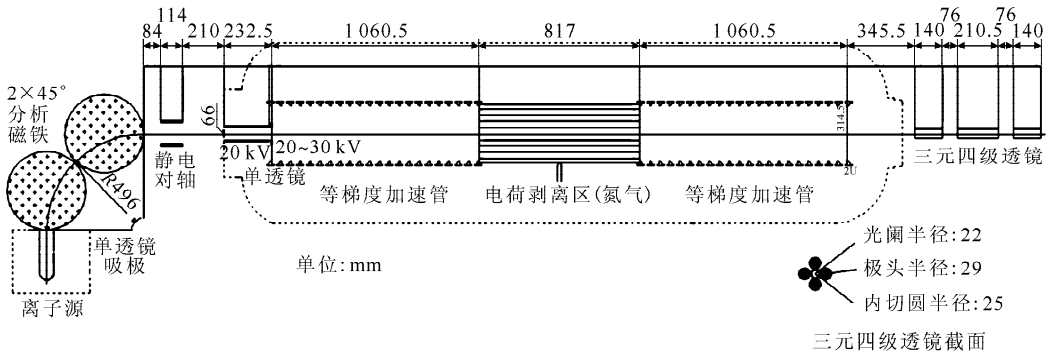


图2 2×1.7 MV 串列加速器内部结构图

Fig.2 Scheme of 2×1.7 MV tandem accelerator

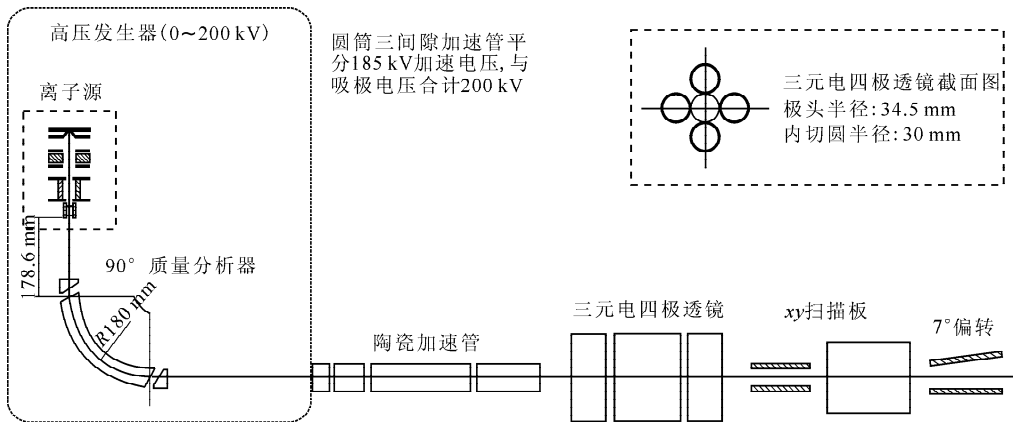


图3 200 kV 注入机内部结构图

Fig.3 Scheme of 200 kV implanter

入 7° 偏转区,再进入低能离子注入靶室。与此同时,中性束由于未被偏转而被清除。经测试,到达注入靶室的氮离子束流在能量155 keV时为 $48 \mu\text{A}$,能量增加时可进一步提高。

1.3 日立 H800 型透射电子显微镜

联机所用电镜为日立 H800 型透射电镜,工作电压 200 kV,最高放大倍数 60 万倍,晶格分辨率 0.204 nm,其双倾样品台可使样品倾斜 $45^\circ\sim 60^\circ$ 。联机装置采用不锈钢波纹管进行加速器与电镜的软连接,以隔绝加速器系统的机械振动对电子显微镜高倍成像的影响。实验表明,在两台加速器都正常运行情况下,电镜测试基本观察不到机械振动。目前,进入电镜室的离子束已达到 120 nA(以氮束为例),可满足对离子注入样品的原位动态结构测试的要求。

联机装置由串列加速器、离子注入机和透射电镜连接而成,联机管道传输路线上安装有二单元静电四极透镜用来对离子束进行聚焦(图1)。

2 光路计算

采用 LEADS 计算时,用 Lie 代数方法建立离子运动的 Hamilton 函数 H 的 Lie 映射,作用于离子在六维相空间中的初始坐标,就得到离子的各级近似轨迹。对于各种静电透镜的计算,程序采用厚透镜处理,即考虑透镜的全部作用区域,将整个作用场区沿轴线划分成若干小段,每个小区近似看作匀加速段,每个分点为 1 个薄透镜,然后,进行 Lie 映射作用就可得到整个透镜中的三级近似轨迹。为了能够进行寻优计算,LEADS 程序采用多离子跟踪与 σ 矩阵相结合的方式,利用 POWELL 非线性最优化方法,通过自动调整某些元件的参数,使系统实现给定的光学条件,如成像、成腰、消色散和限定束斑大小等。因此,LEADS 程序可计算加速器-电镜联机系统中的离子运动。

加速器-电镜联机系统的离子动力学计算结果如图4所示。图4a示出串列加速器离子

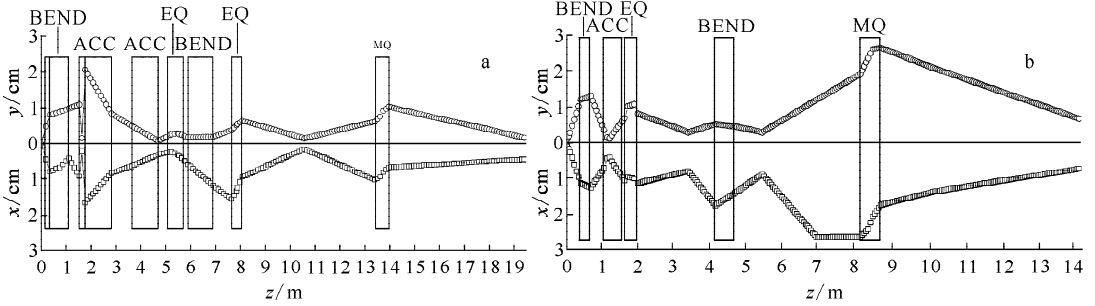


图4 LEADS束流包络线计算结果

Fig. 4 Beam envelopes calculated by LEADS

a——1.7 MV 串联加速器离子源出口至电镜样品中心点的束流包络线;

b——200 kV 注入机离子源出口至电镜样品中心点的束流包络线

□——x; ○——y

源出口至电镜样品台中心点的光路长为 $z=1\,939\text{ cm}$ 的束流包络线(样品中心点处水平方向 $x=0.450\,7\text{ cm}$, 竖直方向 $y=0.156\,5\text{ cm}$)。图 4b 示出注入机离子源出口至电镜样品台中心点的光路长为 $z=1\,420\text{ cm}$ 的束流包络线(样品中心点处水平方向 $x=0.693\,4\text{ cm}$, 竖直方向 $y=0.623\,9\text{ cm}$)。经计算分析,系统中从注入机到电镜中心点长达 14.21 m 的光路只有 1 个二元磁四极透镜是造成最终到达电镜室束流较小的主要原因。

3 改造方案

为提高束流强度,针对该系统中存在的束流漂移管道损失、束斑发散和电镜工作环境等问题,权衡管道长度和电镜隔震,对加速器离子源出口到电镜中心点部分光路提出了以下两种改造方案,并分别对这两种方案中 200 kV 注入机离子源出口至电镜样品中心点的光路进行了 LEADS 束流包络线的计算,为方案的选择提供了依据。

1) 方案 1

改造方案 1 的光路布局示于图 5,加速器开关磁铁出射角由 49° 调小为 13° ,去掉加速器出口开关磁铁与 200 kV 注入机 90° 偏转磁铁之间的二单元电四极透镜,并将 200 kV 注入机向电镜方向平移以缩短漂移管道,减少束流损失。 200 kV 注入机离子源出口至电镜样品中心点的束流包络线 LEADS 计算结果为: $z=1\,140\text{ cm}$, $x=0.165\,23\text{ cm}$, $y=0.473\,7\text{ cm}$ 。计算发现,虽然联机路线漂移管道的缩短在一定

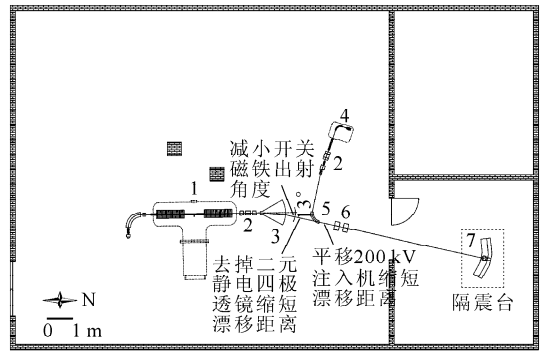


图5 改造方案1的光路布局

Fig. 5 No. 1 scheme for adjustment of interface system

1——串联加速器; 2——三单元静电四极透镜;

3——开关磁铁; 4——离子注入机;

5——偏转磁铁; 6——二单元磁四极透镜;

7——透射电子显微镜

程度上减少了束流的损失,但光路的后半部分很难调整,两个方向不能同时聚焦至可接受尺度。

2) 方案 2

改造方案 2 的光路布局示于图 6。在保持加速器开关磁铁出射角不变的情况下,在 200 kV 注入机 90° 偏转磁铁至电镜长达 9.5 m 的光路处增加 1 个二单元静电四极透镜,并调整现有二单元磁四极透镜的位置以提高传输效率。 200 kV 注入机离子源出口至电镜样品中心点的束流包络计算结果为: $z=1\,420\text{ cm}$, $x=0.184\,3\text{ cm}$, $y=0.016\,2\text{ cm}$ 。计算结果显示,虽然联机系统中离子束运动路程和初始离子束斑与原光路相差不大,但经过磁四极透镜的位置调整和新加入的透镜的再次聚焦,样品中心点处 x 、 y 方向的束斑尺度均有减小。

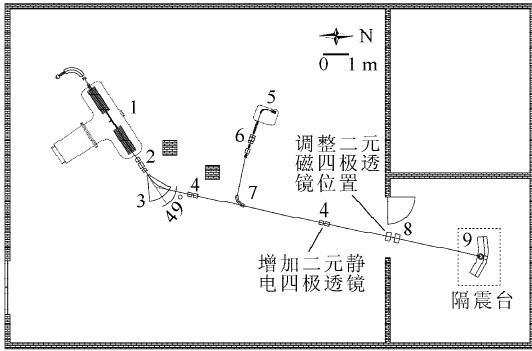


图6 改造方案2的光路布局

Fig. 6 No. 2 scheme of adjustment for interface system

- 1——串列加速器; 2——三单元静电四极透镜;
 3——开关磁铁; 4——二单元静电四极透镜;
 5——离子注入机; 6——偏转磁铁;
 7——二单元磁四极透镜; 8——透射电子显微镜;
 9——二单元静电四极透镜

4 结论

为提高进入电镜室的束流强度,对加速器-电镜联机系统的光路提出了两种改进方案,并用 LEADS 程序对改造后的加速器-电镜联机系统中的离子运动进行了计算。结果显示,在调整原光路二单元四极透镜的同时,在 200 kV 注入机 90° 偏转磁铁至电镜之间增加 1 个二单元静电四极透镜,可有效提高该系统中离子束的传输效率。

参考文献:

- [1] 宋搏,郭立平,黎明,等. 武汉大学加速器-透射电镜联机系统[J]. 核技术, 2007, 30(9):777-780.
 SONG Bo, GUO Liping, LI Ming, et al. The accelerator-electron microscope interface facility at Wuhan University[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(9): 777-780(in Chinese).
- [2] 蒋昌忠,任峰,张丽,等. 加速器-电子显微镜联机进行材料科学研究的新进展[J]. 原子核物理评论, 2003, 20:201-207.
 JIANG Changzhong, REN Feng, ZHANG Li, et al. Progress of accelerator and electron microscope link in study of material science[J]. Nuclear Physics Review, 2003, 20: 201-207(in Chinese).
- [3] RUAULT M O, FORTUNA F, BERNAS H. In situ transmission electron microscopy ion irradiation studies at Orsay[J]. J Mater Res, 2005, 20: 1 758-1 768.
- [4] ISHINO S. A review of situ observation of defect production with energetic heavy ions[J]. J Nucl Mater, 1997, 251: 225-236.
- [5] LÜ J Q. A computer code for beam optics calculation-third order approximation [J]. Prog in Natural Sci, 2006, 16: 6.
- [6] GUO L P. Establishment of in situ TEM-implanter/accelerator interface facility at Wuhan University[J]. Nucl Instrum Methods, 2008, A586: 143-147.