

国产高能量电子枪的研发*

游燕 臧侃 郭方准[†]

(大连交通大学 先进装备技术研究所 大连 116028)

2015-06-14收到

[†] email: guofz@hotmail.co.jp

DOI: 10.7693/wl20151109

Development of domestic high energy electron gun

YOU Yan ZANG Kan GUO Fang-Zhun[†]

(Institute of Advanced Equipment & Technology, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

摘要 文章介绍了自主研发的高能量电子枪的原理、设计和测试结果。该电子枪主要由电子发射组件、电磁聚焦组件、电磁偏转组件、差分抽真空维持机构和控制电源构成,可以发射、聚焦并偏转高能量电子。测试结果显示,电子枪发射的电子能量最大可达30 keV,加速电压和发射电流成正比例对应关系,电子束斑直径在100 μm以下,电子束偏转角度大于5°。通过实测Si(111)单晶体,获得了良好的电子衍射图像。

关键词 电子衍射, 电子枪, 电磁聚焦, 电磁偏转, 表面科学

Abstract The principle, design and test results of a domestically made high-energy electron gun are described. It consists mainly of a filament, electromagnetic focusing lens, electromagnetic deflection lens, differential vacuum pumping unit, and power supply. It is capable of producing high energy electrons up to 30 keV. The electron beam can be deflected more than 5° and the beam size focused to less than 100 μm. The acceleration voltage is found to be directly proportional to the emission current. Details of the design and test results are reported.

Keywords electron diffraction, electron gun, electromagnetic focusing, electromagnetic deflection, surface science

固体表面的原子由于失去本体原子的排列周期性,会表现出一系列不同的物理化学性质。在理论和应用领域备受关注的纳米科技,归根结底就是表面科学的一部分^[1]。表面科学的研究离不开各种表面分析仪器,典型的分析仪器有电子显微镜(TEM)、俄歇电子能谱仪(AES)、低能量电子衍射仪(LEED)和反射高能电子衍射仪(RHEED)等^[2]。RHEED由于适用真空范围广、可原位分析以及衍射图像包含的信息量大等,成为表面科学装置特别是薄膜生长系统的重要配置之一^[3-5]。RHEED装置主要由电子枪和荧光屏组成,进行RHEED实验,要求电子枪具有能量高、束斑直

径小、强度大和入射角度可调等功能。我国目前尚无国产的用于表面科学领域的高能量电子枪,相关产品过度依赖进口,不仅使我国的科学研究受制于国外,也限制了我国自主创新的能力。

我们综合国际上各种电子枪的特长,研发制作了适合RHEED的国产高能量电子枪,其原理和测试结果将于文中详述。

1 高能量电子枪的原理和设计

高能量电子枪的主体构造如图1所示,主要由电子发射组件(圆圈内部分)、电磁聚焦组件5、电磁偏转组件6和差分抽真空维持机构3组成。

*国家自然科学基金(批准号:51207016,51477023)资助项目;辽宁省高等学校优秀人才项目(批准号:LJQ2014046)

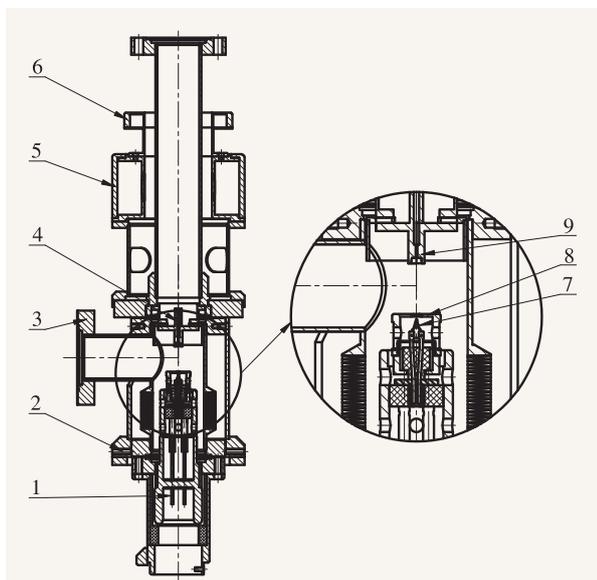


图1 高能电子枪的主体构造图(1.电极; 2.角度微调机构; 3.差分抽真空维持机构; 4.准直孔; 5.电磁聚焦组件; 6.电磁偏转组件; 7.阴极灯丝; 8.控制极; 9.阳极)

电子枪主体通过高压电缆和控制电源连接,可实现电子的发射、加速、聚焦和偏转。整套高能电子枪的用材完全符合超高真空环境的使用要求,其中的电气绝缘部分采用三氧化二铝材料,其他和真空接触的部分大多采用SUS304不锈钢。该电子枪连接真空腔室的接口法兰为国际标准的ICF70(2.75英寸),可耐150℃的高温烘烤。

高能电子枪采用V形发叉式阴极,V形的尖端作为点发射源,曲率半径0.1 mm。阴极为直径0.1 mm的钨丝(功函数4.5 eV),通电加热后放出热电子,热电子发射的饱和电流密度 J_0 遵循理查德森规律(Richardson law):

$$J_0 = A_0 T^2 e^{-\Phi_M/kT} \quad (\text{A/cm}^2) \quad ,$$

式中 A_0 为发射常数(其数值因发射材料的不同而不同), T 为发射体的绝对温度, Φ_M 为发射极的功函数(单位为eV), k 为玻尔兹曼常数值。发射出的饱和电流密度 J_0 随着温度的提高急剧地增加。但是并不是灯丝的温度越高越好,太高会影响灯丝的使用寿命,太低会影响发射效率^[6]。因此,综合灯丝的发射效率和使用寿命,我们设定灯丝的工作温度在2700 K左右。

阴极灯丝发射出来的热电子能量较低,我们在阴极的后方设置阳极,以实现热电子的加

速。为了安全,阳极接地为零电位,阴极为负电位。如果阳极和阴极之间的电位差为 U ,则电子被加速并获得动能 eU 。阳极与阴极之间的电压差决定了入射电子的能量。本高能电子枪设计的最大电子能量为30 keV,发射出的电子对应波长为0.00698 nm。

阴极和阳极之间设置一个中心带小孔的控制极(Wehnelt electrode)。控制极的电位比阴极略低(低几十伏特),一方面发挥静电透镜的作用使电子束向中心轴会聚,同时也起到调控热电子发射量的作用。

RHEED的重要用途之一就是原位观察特殊气氛环境中的薄膜生长,特别是在高氧气氛中进行脉冲激光分子束外延生长^[7]。在高氧气氛中灯丝高温工作,意味着灯丝寿命的迅速缩短。一般阴极灯丝区域的真空度要好于 5×10^{-4} Pa,而各种氧化物薄膜生长的氧气压大都在几个到几十个Pa范围内,本套高能电子枪中差分抽真空维持机构3的设计,使得真空腔室与阴极灯丝区域之间有几个量级的压强差,极大地延长了特殊气氛实验时阴极灯丝的使用寿命^[8,9]。本套电子枪的构造,充分发挥了阳极接地并带有小孔的特点。阳极将真空腔室所在空间和阴极灯丝所在空间分成两个区域,小孔的直径是2 mm。由于小孔的存在,使得两个独立排气的空间有可能存在压强差。即,向实验真空腔室内导入气体处于较低真空时,阴极所在的较小空间在强大排气状况下,仍能维持较高的真空,实现差分抽的可能。差分抽真空维持机构3由差分抽法兰和短管组成,当实验腔室真空度较低时,为了使得阴极灯丝区域维持较好的真空度,我们在差分抽法兰端口中连接一真空泵,从而实现差分抽功能。

在电子发射组件中,阴极灯丝7、控制极8和阳极9的同轴度要求严格,我们在灯丝底座上设计了角度微调机构2,通过4个精密螺丝可调节阴极灯丝和其他两个电极的同轴度。为了使电子束具有较好的指向性,阴极灯丝发射出的电子束要穿过阳极的准直孔。电子发射组件独立设置在一个角度可调机构上,可以独立调节和准直孔的同轴度。

经阳极加速后的电子在飞行过程中,由于空

间电荷的同性排斥会导致电子束逐渐发散，我们采用电磁透镜对电子束进行聚焦。电磁聚焦组件由集束线圈罩、集束线圈轴和集束线圈组成，集束线圈绕成空芯形式。集束线圈轴由图2(a)中的1, 3和4组成，1, 3是强磁性材料(SUS430 不锈钢)，中间通过铜环4连接成一体。线圈通电后产生磁场，磁场沿强磁性线圈罩2构成回路。当磁场遇到非强磁性铜环空间时，磁力线迅速向轴心空间扩散，从而在轴心形成强大的磁场。电磁聚焦组件的结构设计剖面图和轴向磁感应强度的模拟如图2(a)所示。从图2(a)中可以看到，当线圈匝数为100，通入电流为1 A时，电磁聚焦组件轴向磁场分布的模拟效果。图中不同颜色代表磁感应强度(单位为特斯拉T)的差异，从图中可知，靠近集束线圈轴中铜环附近的磁感应强度较大。由于电磁聚焦组件的轴向磁场是不均匀的，故作用于电子的力是变化的。平行于轴入射的电子，每一瞬时都同时受到切向力和径向力的作用，形成圆锥螺旋近轴运动。利用这一特殊构造的电磁聚焦组件所产生的强大磁场，可以实现对几十keV高能电子的聚焦。

高能电子波长短，有较大的Ewald球(半径为 $1/\lambda$ ， λ 为波长)。小角度掠射样品后，经过样品表面衍射后的电子束照射到电子枪对面的荧光屏上，荧光屏上的电子衍射斑点通过玻璃窗在真空系统外被直接观察，或被相机记录后进行分析。小角度掠射是RHEED的基本特征，这也要求电子枪可以自我调节电子束发射角度。我们采用了偏转像差小且偏转灵敏度高的磁偏转的方式来实现电子束的偏转。磁偏转是由安装在管径外两侧的两对相互串接的线圈实现的，为了获得均匀的与管轴垂直的横向磁场，线圈应该绕制成特定的环型形式^[10]。电磁偏转组件由两对偏转线圈组成，且互相垂直放置，分别为水平偏转线圈(I)和垂直偏转线圈(II)。图2(b)是偏转线圈I当匝数为135，电流为1 A时的磁感应强度模拟结果，图中不同颜色代表磁感应强度的不同。当保持线圈II的电流不变，调整线圈I的电流时，可实现发射电子Y方向的偏转；保持线圈I的电流不变，调整

线圈II的电流时，则可实现发射电子X方向的偏转。由于在调整某个组的线圈电流大小时，另一组的线圈中仍通有电流，所以在电磁偏转组件中产生旋转式磁场。

高能电子枪的主体构造所处的电位关系如图3所示。控制电源与电子枪之间通过多根电缆

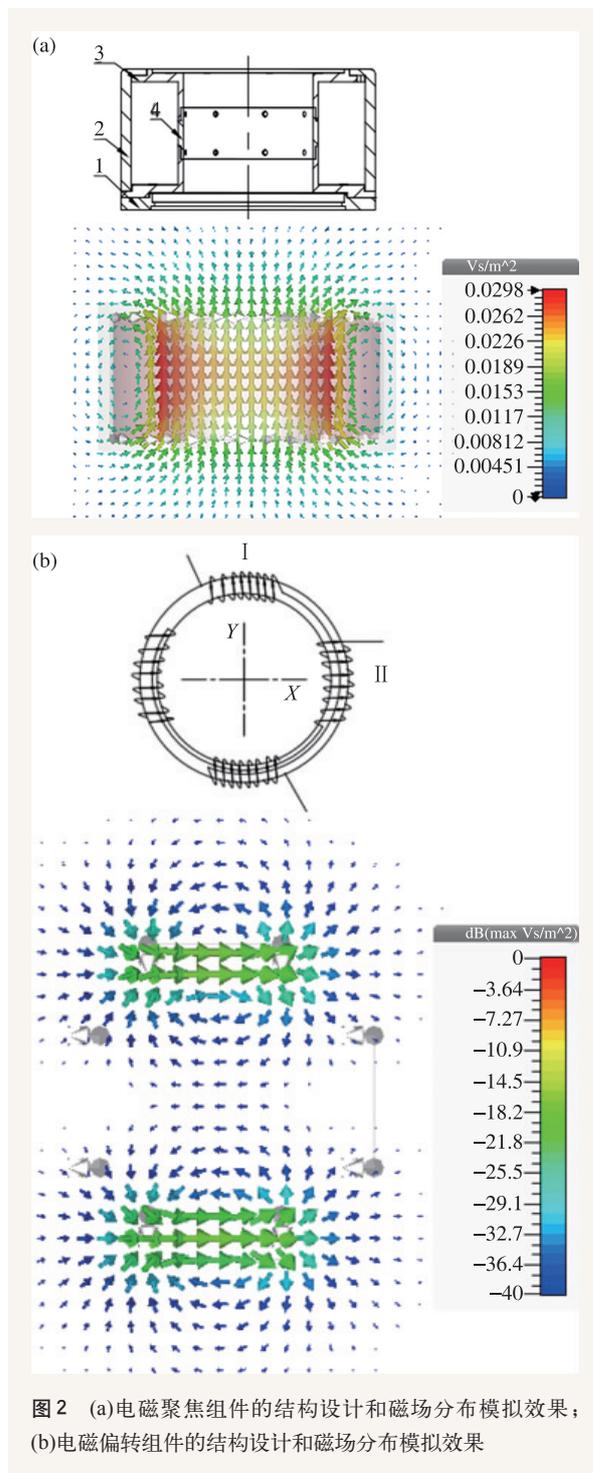


图2 (a)电磁聚焦组件的结构设计和磁场分布模拟效果；(b)电磁偏转组件的结构设计和磁场分布模拟效果

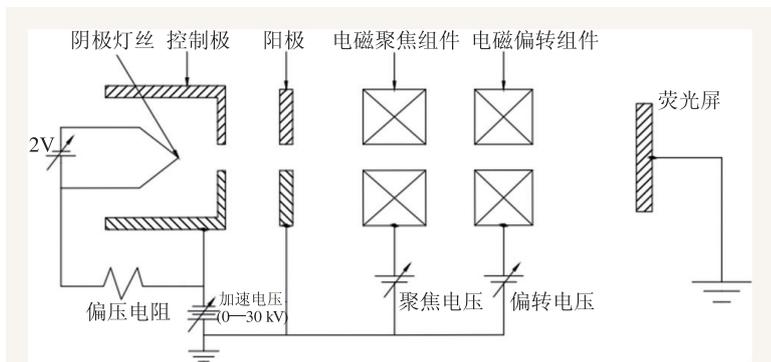


图3 高能电子枪的主体构造所处电位关系示意图

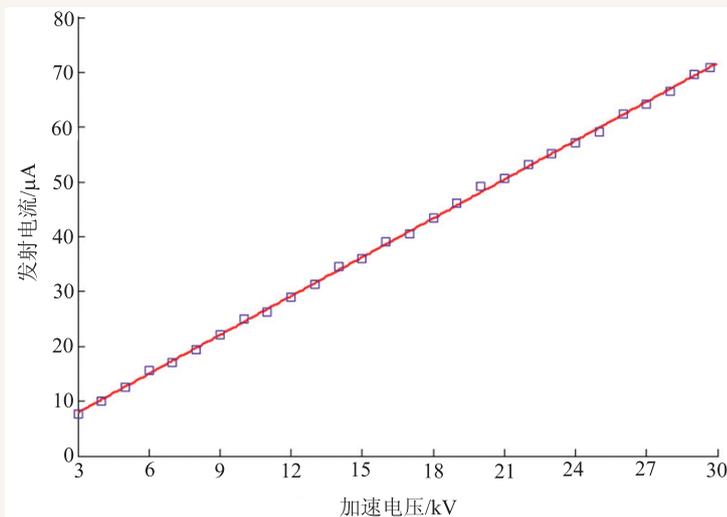


图4 加速电压和发射电流的对应关系

连接，将所需的电压或电流值传递给电子枪上的相应电极。阴极灯丝和控制电极整体浮在负高压上，控制电极和灯丝电压有固定关系。这种电路设计使得复杂的高能电子枪电控变成单纯的两个调节，即负高压(加速电压)和灯丝电流。调节电子束偏转角和聚焦的两套电磁组件，通过电源提供直流电即可工作。考虑到高压电源的使用安全性，我们设计了安全自锁功能，如果电子枪各部件绝缘或导通不合格，则无法施加高电压。

2 高能电子枪的测试

为了测试高能电子枪的基本性能，我们设计制作了一套超高真空系统。真空腔室上端连接样品台，样品台前端安装可对Si(111)晶体闪硅(瞬

时加热到1250 °C)处理的样品架。考虑到RHEED的电子束掠射，安装电子枪的法兰和样品表面成3°入射角。我们将高能电子枪连接在真空腔室上，电子枪对面安装了荧光屏和玻璃窗。电子枪法兰端面到样品的距离以及样品到荧光屏的距离均为150 mm。真空获得通过分子泵和机械泵组合来完成，真空检测通过全量程真空计完成。RHEED电源启动之前，确认样品不会遮挡电子束，灯丝导通，加速电极绝缘正常，发射电流旋钮为零，加速电压为零，聚焦和偏转调节旋钮处于中间位置。

当系统的真空度达到 10^{-4} Pa时，启动电子枪的控制电源。旋转加速电压调节旋钮，将加速电压缓慢升至所需的高电压。旋转发射电流调节旋钮，直至在荧光屏上观察到直射的电子束斑。电源内部对阴极灯丝和控制电极的相对电压设定相互关联，针对一个加速电压，只有一个最佳的发射电流值，即电子束斑

强度最大值。观察荧光屏上电子束斑强度随着电压和发射电流变化，我们获得3 kV至30 kV之间加速电压和最佳发射电流的对应关系(如图4)。从实验结果可知，加速电压和发射电流成线性正比例关系。

我们将细钨丝通过陶瓷部件固定在高精度直线导入器的前端，细钨丝和微电流表连接构成回路。操作高精度直线导入器使细钨丝横穿电子束斑，分析所测电流值和钨丝的位置，确认电子束斑可集束的直径小于100 μm。调节偏转线圈的电流值，观察电子荧光屏上电子束斑的移动范围，可以确认电子束斑可偏转的角度大于5°。

为了验证高能电子枪的实际应用效果，我们选用Si(111)单晶体作为样品，实测了RHEED效果。我们对Si(111)单晶体直流通电后进行多次

闪硅处理,以获得重组后的清洁表面。设定入射电子的能量为25 keV,获得的RHEED图像如图5所示。从图像中可以清楚地看到由弹性散射电子引起的7×7衍射斑点和非弹性散射电子引起的菊池线。改变电子能量,衍射斑点和菊池花样发生相应的位置和强度变化。

3 结束语

自主研发生产的高能量电子枪经过综合测试,电子能量最大可达30 keV,加速电压和发射电流成正比例对应关系,电子束斑直径在100 μm以下,电子束偏转角度大于5°。实测Si(111)单晶体,我们获得了良好的电子衍射图像。

本高能量电子枪的各项实测指标,完全达到了设计标准,可以作为RHEED的电子枪来进行

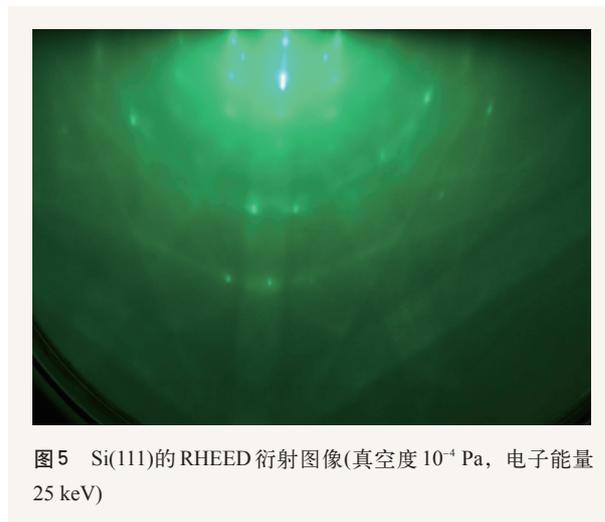


图5 Si(111)的RHEED衍射图像(真空度 10^{-4} Pa,电子能量25 keV)

实时原位的表面原子构造和动力学分析。该高能量电子发射枪的成功研发,提高了我国在小型高能量电子发射领域的综合技术水平,推动了国产表面分析仪器的发展。

参考文献

- [1] 臧侃,董华军,郭方准. 物理,2014,43(1):49
- [2] 罗子江,周勋,王继红等. 真空科学与技术学报,2014,34(4):426
- [3] Van Gorkum A A, Smits M R T, Larsen P K. Review of Scientific Instruments, 1989, 60 (9):2940
- [4] Larsen P K, Dobson P J. NATO ASI series, 1988, 188(10):20
- [5] 葛芳芳,白黎,吴卫东等. 真空科学与技术学报,2009,29(4):341
- [6] 魏贤华. 反射高能电子衍射在薄膜生长中的表面分析. 北京:科学出版社,2012
- [7] Li J, Peng W, Chen K *et al.* Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2013, 56 (12):2312
- [8] Guus J H M R, Gertjan Koster, Dave H A B *et al.* Applied Physics Letters, 1997, 70 (14):1888
- [9] 陈莺飞,彭炜,李洁等. 物理学报,2003,52(10):2601
- [10] 王文祥. 真空电子器件. 北京:国防工业出版社,2012

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

被选用的封面素材提供者,均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029。

《物理》编辑部