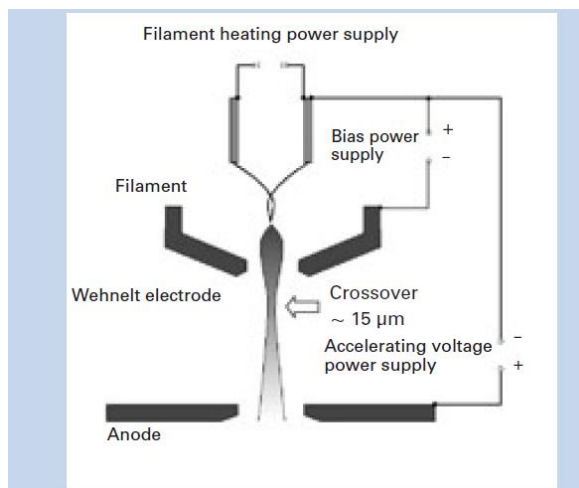


浅谈扫描电镜电子源

应用工程师 陈青山

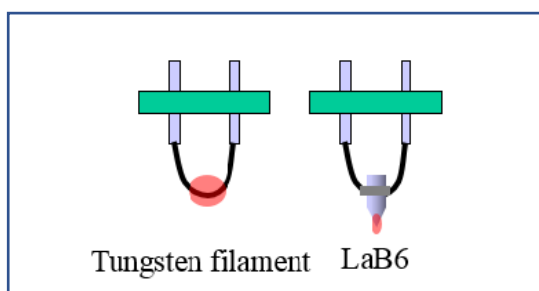
一. 电子枪 (Electron Gun) 之热发射枪 (TE Gun)



图一 热发射枪 (TE Gun) 示意图

电子枪是电子光学里的重要部件之一，是用来产生电子束的。图一显示的是热发射方式电子枪 (TE gun)。

图一中，灯丝 (Filament)，是由钨丝构成，成叉叉式 (大概直径 100 μ m)；或由人工晶体 LaB₆ 构成 (如图二)。



图二 灯丝示意图

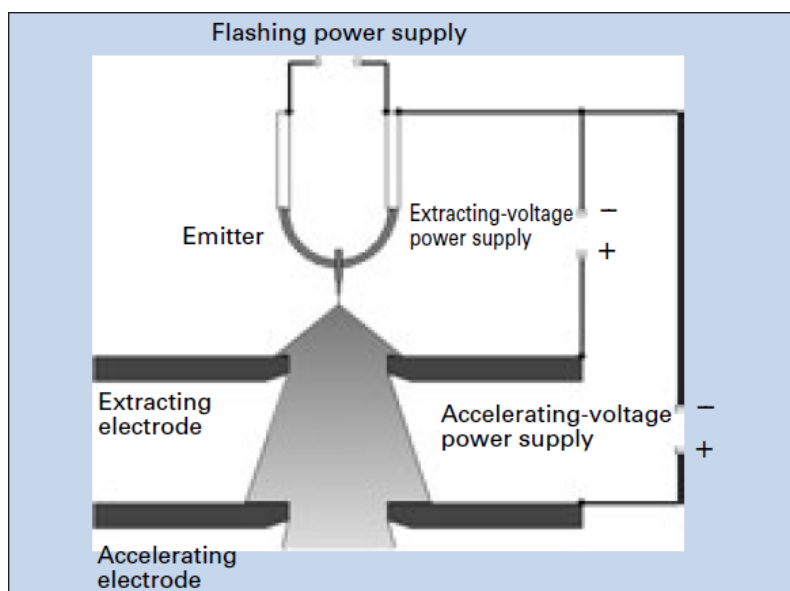
当灯丝上加载电流之后，灯丝就像白炽灯泡一样，灯丝电流 (Load current) 通过灯丝并加热灯丝在真空中达到一定温度。钨灯丝达到约 2500 $^{\circ}$ C，LaB₆ 晶体达到约 1600 $^{\circ}$ C。热电子即获得足够多的能量，克服逸出功从阴极材料 (钨/ LaB₆/ 其它材料等) 表面逃逸到了真空中，汇成电子束。通过调节灯丝电流 (Load current)，使灯丝处于第二饱和点稍欠，既保证了足够多的电子，又

保证了灯丝足够长的寿命（灯丝寿命和其周围的真空度也有很大的关联性）。

电子束在加速电压的作用下，从灯丝（阴极）通过阳极正中心的孔流入透镜系统。可通过调节栅极偏压（Bias）来调节束流（或称其为发射电流）。电子束在流出栅极时，在栅极偏压的作用下汇聚成第一个汇聚点（Cross over），这一位置的束斑直径大概是 15 μm 左右，和最后到达样品时的束斑直径（nm 级别）相比，尺寸大很多。

日本电子（JEOL）现有的此类机型包括 JSM-IT500(LA)，JSM-IT200（LA），JCM-7000 等，以上机型均可配置一体化能谱分析仪和高/低真空系统。

二. 电子枪（Electron Gun）之冷场发射枪（Cold FE Gun）



图三 冷场发射电子枪示意图

一般来说，现在高分辨扫描电子显微镜配备的电子枪都是场发射电子枪（Field Emission Gun）。

图三所示的即为冷场发射电子枪（Cold FE Gun）的结构。首先，阴极（即发射体）是由很细的钨丝，和在其尖上焊接曲率半径 100nm 左右的钨单晶构成。发射体下方电极上（被称为拔出极）加了正电压（几千 V），于是隧道效应发生了，电子被发射出来。拔出极是有孔的，于是电子流入孔中。拔出极下方的阳极（也被称为加速极）开始对电子做功，具有一定动能的电子束进而进入透镜系统。为了场发射这一运动的产生，发射体尖附近需要很高的真空程度。一般最好的能达

到 10^{-8} Pa。

但是，即使这么高的真空度，发射体尖部附近也会有空气分子存在，在强大的拔出电场作用下遭电离并吸附于发射体尖部上，于是发射电流降低。为了保持发射电流，就需自动或手动提高拔出电压来克服。直到拔出电压过高保护（在发射体寿命快终结时会出现此情况），或每 24 小时自动 Flash 一次，烘烤发射体，使吸附于发射体尖部的空气离子脱离金属表面。发射体尖再次洁净，使用时只需较小的拔出电压即可拥有足够的发射电流了。

上文提到，热发射电子源直径达到 15 μ m 左右。冷场发射电子源则小得多，只有 5-10nm。另外，冷场发射电子源还有个优点是能量发散度比热发射式的要小很多， ΔE 约为 0.3eV。

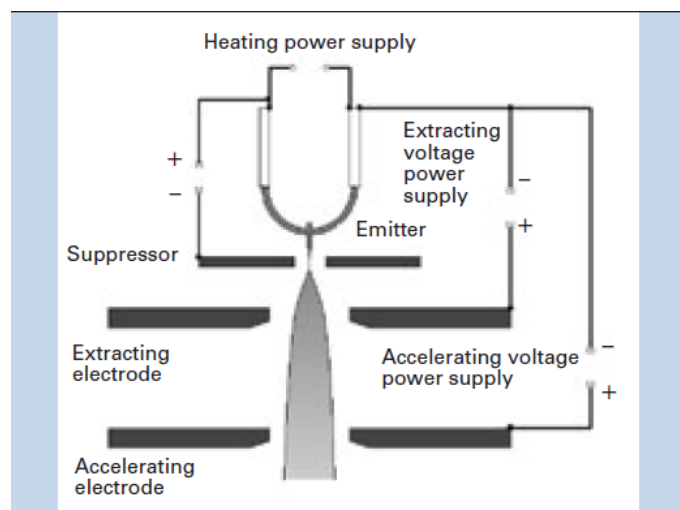
另外，选择冷场发射方式还需注意，因为冷场发射枪需要很小心地控制小发射固体角，以保证小束流，否则即使很小一部份发射电流撞击在第一阳极（拔出极）上激发出离子，都很有可能将发射体打坏。所以冷场发射扫描电镜的探针电流比较弱，一般从几 pA 到几 nA，而且束流无法长期稳定。也就是这一比较明显的“特点”，冷场发射扫描电镜渐渐成为进行块体样品表面高分辨率观察的工具而无法满足用户对块体样品表面分析和加工的应用需求，如 EDS mapping, EBSD, WDS, SXES, Electron Beam Lithography 等等，也就渐渐淡出了市场。

三. 电子枪（Electron Gun）之热场发射枪（TFE Gun）

所谓的热场发射枪是 ZrO_2/W 发射体利用肖特基发射原理发射出电子来。这里需要几个条件：

1. 金属钨的尖端半径 $r \approx 0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ ，电位梯度 $|E| > 10^6 \text{V/cm}$ 。
2. ZrO_2 镀层可使金属钨的功函数从 4.5eV 将至 2.7eV。
3. 发射体温度超过 1500 $^{\circ}\text{C}$ 。

当以上条件满足后，电子将被激发出金属表面而进入真空中。由此，得到了很大的电子束流。如下图所示，肖特基发射体结构更复杂。热发射枪包括一个栅极，一个抑制极和一个阳极。冷场发射枪包括一个栅极和两个阳极。肖特基发射枪包括一个栅极，一个抑制极和两个阳极，结构更复杂。



图四 肖特基式电子枪示意图

肖特基式电子枪发射电流比冷场发射电子枪高好几个数量级，是否发射体的寿命会比较短？其实不然，电子是由发电厂通过电线源源不断地运过来的，可以基本上认定，只要这台电镜供电正常，所用的电子是无穷尽的。那么为什么发射体还会有寿命？主要是真空度的原因。热发射枪的灯丝由于所处空间真空度不够高（约 10^{-3}Pa ），钨灯丝会在高温下氧化、升华，直到灯丝的某一处熔断。冷场发射枪发射体尖端半径很小大约 $0.1\mu\text{m}$ ，空气离子会不断撞击发射体尖端，而每天必做的 Flash，也会使发射体尖端在高温下慢慢钝化。一旦造成尖端半径增大，隧道效应不能产生，电子就不能被激发出来了。肖特基发射枪发射体周边空气离子会不断轰击发射体尖端，造成 ZrO_2 的流失直至消耗光，隧道效应也就消失了。

另外，肖特基式发射方式是不是产生的电子是热的，冷场发射方式产生的就是冷的？其实也不能这么理解。这个冷热，是发射体的温度，也就是发射体金属所处的环境。不论是电能还是热能，最终都会转化为电子的动能，克服费米能级之后逸出金属表面。这时电子所带有的能量为动能而非热能。最终，电子束在真空中运动，到达样品表面，和样品发生非弹性散射后，才会出现动能转换成热能的情况（弹性散射的电子没有能量损失，动能不会转换成热能）。这个过程产生的热量才是会影响样品局部温度的热量。

日本电子现有的此类机型包括 JSM-7900F 系列，JSM-7800F 系列，JSM-7600F 系列，JSM-7000F 系列，JSM-7100F 系列，JSM-7200F，JSM-IT500HR(LA) 系列。