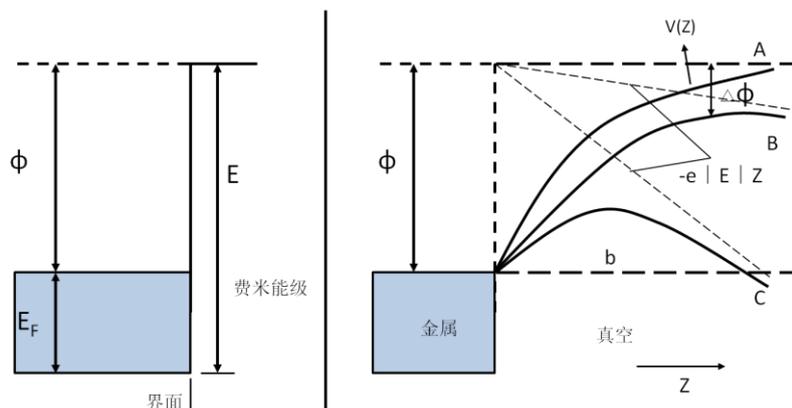


## 扫描电镜发射源的发展

扫描电镜的性能受到多种因素的影响，如发射源的种类（钨灯丝、场发射）、各级透镜的设计方式（内透镜、外透镜、半内透镜）、各探测器的种类和接收方式（二次电子探测器、背散射电子探测器等）以及电镜结构的优化等等，其中发射源的种类对扫描电镜的性能影响最大。

目前扫描电镜的发射源主要有热发射型电子枪和场发射型电子枪两大类，其中热发射型电子枪的灯丝主要有钨灯丝和六硼化镧（LaB6），而场发射电子枪又分为肖特基热场发射和冷场发射两种。由于扫描电镜的图像是依靠会聚的电子束探针在样品表面进行光栅式扫描获得的，因此电子探针的束斑直径直接决定了扫描电镜的分辨率。而发射源又直接决定了电子探针的束斑直径。发射源的直径越小、亮度越高、电子的能量发散度越小，则电子探针的束斑直径也越小，色差也越小，有利于高分辨图像的获得；而发射源发射电流越大，则有利于提高图像信噪比，也有利于大束流分析。但是目前的发射源很难同时满足高分辨率和大束流的要求，因此寻找新的扫描电镜发射源对于提高电镜整体的性能至关重要。



## 图一 金属-真空界面上电子能量的费米分布和势能曲线

### A 无外电场时的势能曲线

### B 弱外电场时的势能曲线

### C 强外电场时的势能曲线

作为一个理想的电镜发射源，它必须具有以下几个特点：低的功函数、低的挥发性、低的导电性、高的耐化学腐蚀性以及高的机械强度。电子从金属中发射出来需要克服一定的势垒（如图一所示），我们可以通过提高电子的运动能力（如热发射型电子枪）、降低势垒的高度（如肖特基热场发射电子枪）或者减小势垒的宽度（如冷场发射电子枪）等方法来帮助电子从金属灯丝中发射出来，当然我们也可以直接采用更低功函数的灯丝来减小电子出射的难度（如 GdB6 的功函数为 1.5eV，而 LaB6 的功函数为 2.5eV，因此电子更容易从 GdB6 灯丝中发射）。灯丝的发射电流可以通过如下公式[1-3]计算得到：

$$J = \left[ 2.23 \times 10^{-25} (E^2/\phi) \exp((4.12 \times 10^{-9})/\phi^{0.5} - 1.02 \times 10^{38} \phi^{1.5}/E) \right] \quad (1)$$

式中 E 为灯丝针尖所加的电场强度，且 E 与灯丝所加的电压 V 和灯丝尖端半径 r 有关， $\phi$  为灯丝功函数。

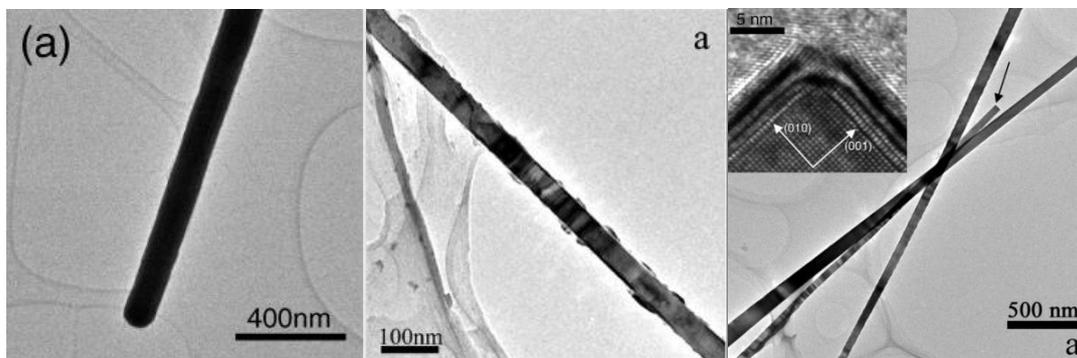
从公式一可见，提高灯丝针尖所加电场强度可以大大提高灯丝的发射电流，而 E 又与灯丝所加电压和灯丝半径有关，故采用高的灯丝电压或者采用更细的灯丝针尖都可以提高灯丝的发射电流。目前扫描电镜中常用的场发射电子枪的灯丝直径远小于钨灯丝的直径，因而具有较高的分辨率。但即使是场发射灯丝，目前的肖特基热场或者冷场发射模式都还存在一定的缺陷。

常见的肖特基热场灯丝主要是由钨灯丝和氧化锆涂层两部分组成，通过加热灯丝将氧化

天美（中国）科学仪器有限公司  
TECHCOMP (CHINA) LTD.

中国北京朝阳区天畅园 7 号楼 1、3 层  
TEL:010-64010651  
FAX:010-64060202  
E-MAIL:techcomp@techcomp.cn

钨涂层熔融来降低灯丝的势垒，从而使电子发射。但这种灯丝的结构复杂，制作成本较高，且熔融的氧化钨涂层会限制灯丝尖端的直径，涂层也会随着使用时间的增加而不断消耗，最终只剩下钨灯丝，所以灯丝寿命较短。这种灯丝的特点是发射电流相对较大，但加热后的灯丝使其电子能量发散度也会相应变大，从而增大色差，加上发射源尺寸较大，因此肖特基热场发射电子枪的分辨率不高。而冷场发射灯丝则是由极细的单晶钨制成的，相对于肖特基热场灯丝更细，且冷场灯丝是通过直接加强电场的方式将电子从灯丝引出的，不需要加热灯丝，因此其发射源的亮度、尺寸、电子能量发散度以及寿命都优于肖特基热场灯丝，适合高分辨率的观察。但是普通冷场发射电子枪的一个限制是其发射电流较小，对于一些大束流的分析有困难（如大面积电子束曝光，阴极荧光分析等）。



**图二 LaB6（左）、CeB6（中）、GdB6（右）单晶纳米线**

从公式一可见，如果能进一步减小灯丝尖端的直径，则发射电流的强度会进一步提高。因此，我们希望能够获得更细的灯丝。目前，由秦禄昌等人[4]研制的 LaB6 纳米线冷场发射源已经获得了重大突破。利用合成的 LaB6 单晶纳米线作为冷场发射电子枪的发射源，其尖端直径只有几十纳米，远小于一般的场发射电子枪灯丝。更小的灯丝直径意味着可以在相同的灯丝电压下获得更大的发射电流、更小的发射源直径、更高的亮度，这对于提升整个电镜

天美（中国）科学仪器有限公司  
TECHCOMP (CHINA) LTD.

中国北京朝阳区天畅园 7 号楼 1、3 层  
TEL:010-64010651  
FAX:010-64060202  
E-MAIL:techcomp@techcomp.cn

的分辨率有重要的意义，而更大的发射电流也弥补了普通冷场发射源的短板，是真正的理想的发射源。除了 LaB6 单晶纳米线之外，六硼化铯（CeB6）和六硼化钆（GdB6）[5]单晶纳米线也已经合成出来了，且 GdB6 的功函数更低，更有利于电子的发射，是新一代扫描电镜发射源的有力竞争者。目前，日立公司正在积极参与这方面的研究，相信在不久的将来，更加优异的纳米线冷场发射电子源将与我们见面。

#### 参考文献

- [1] Fowler R H, Nordheim L. Electron emission in intense electric fields[C]//Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1928, 119(781): 173-181.
- [2] Brodie, I.; Spindt, C. A. In Advances in Electronics and Electron Physics; Hawkes, P. W., Ed.; Academic Press: San Diego, 1992; Vol.83, Chapter 2.
- [3] Jonge, N. D.; Allieux, M.; Oostveen, J. T.; Teo, K. B. K.; Milne, W. I. Phys. Rev. Lett. 2005, 94, 186807.
- [4] Zhang H, Zhang Q, Tang J, et al. Single-crystalline LaB6 nanowires[J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(9): 2862-2863.
- [5] Zhang H, Zhang Q, Tang J, et al. Single-crystalline CeB6 nanowires[J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(22): 8002-8003.
- [6] Zhang H, Zhang Q, Zhao G, et al. Single-crystalline GdB6 nanowire field emitters[J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(38): 13120-13121.