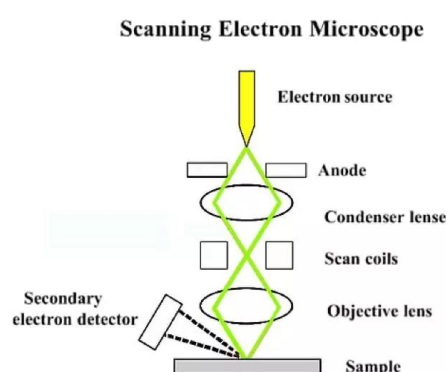


扫描电子显微镜(SEMs)已成为功能强大、用途广泛的材料表征工具，尤其是近年来，各种应用中使用的材料尺寸也在不断缩小。

电子显微镜利用电子成像，类似于光学显微镜使用可见光成像。透射电子显微镜(TEMs)可以检测穿过极薄样品的电子来成像，与其不同的是，扫描电子显微镜是利用反射或撞击扫描样品近表面区域的电子来产生图像。由于电子的波长远小于光的波长，所以扫描电子显微镜的分辨率要高于光学显微镜的分辨率。

扫描电子显微镜的工作原理：在扫描电子显微镜中，电子束以栅网模式扫描样品。首先，电子枪在镜筒顶部生成电子。当电子的热能超过了源材料的功函数时，就会被释放出来，然后它们加速向带有正电荷的阳极高速移动。



扫描电子显微镜的基本构造

整个电子镜筒必须处于真空状态。像电子显微镜的所有组件一样，电子枪也被密封在特殊的真空室中以保护它不受污染、振动和噪音的影响。除了保护电子枪不受污染，真空环境有利于得到高分辨率的图像。若非真空环境，镜筒中可能存在其他原子和分子，它们与电子相互作用，使电子束发生偏转，从而降低图像质量。高真空环境也提高了镜筒内检测器对电子的收集效率。

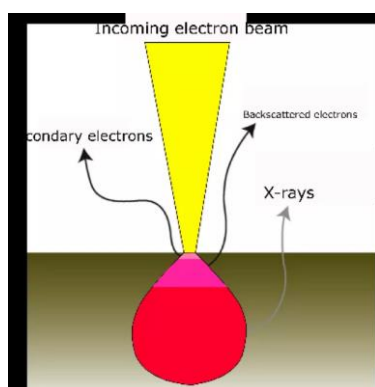
控制电子路径：与光学显微镜类似，透镜用来控制电子路径。因为电子无法穿过玻璃，所以必须使用电磁透镜。它们由线圈和金属极片构成。当电流通过线圈，就会产生磁场。由于电子对磁场非常敏感，因此只需调节所施加的电流大小就可以控制显微镜镜筒内的电子路径。

通常，电磁透镜有两种：聚光镜是电子向样品移动时遇到的第一个透镜。该透镜在电子束锥再次打开前使电子束会聚，并在撞击扫描样品之前由物镜再次会聚。聚光镜决定了电子束的大小(这决定了分辨率高低)，而物镜的主要作用是将电子束聚焦到样品上。

扫描电子显微镜的透镜系统还包含扫描线圈，用来对样品表面进行栅网式扫描。很多时候，会将光阑与透镜相结合来控制电子束的大小。

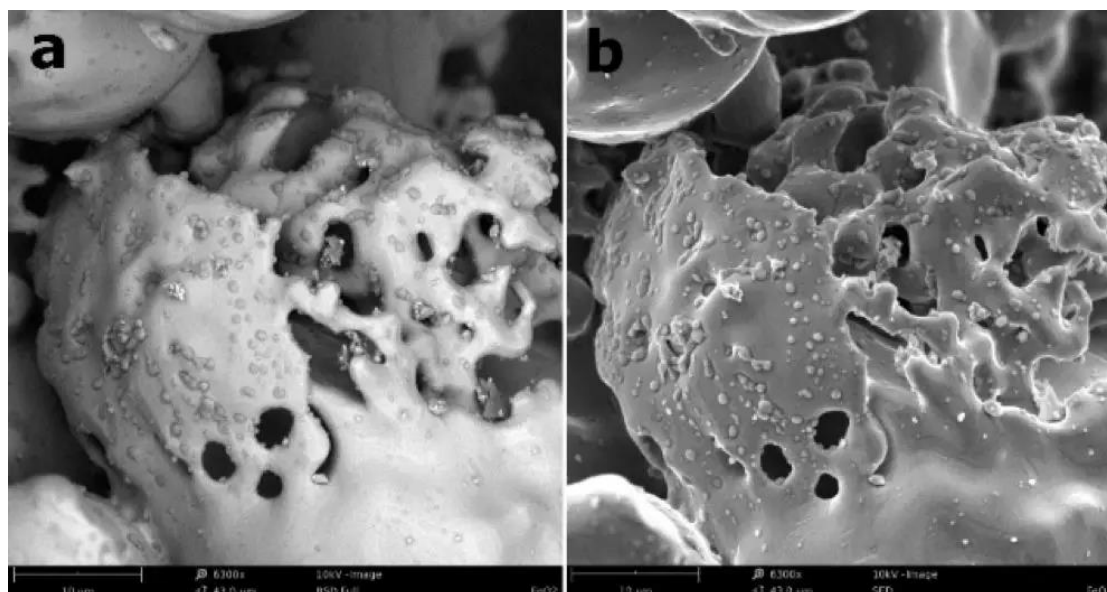
背散射电子和二次电子：样品中电子的相互作用可以产生许多不同类型的电子、光子或辐射。就扫描电子显微镜而言，用于成像的两种电子是指背散射电子(BSE)和二次电子(SE)。

背散射电子属于初次电子束，在电子束与样品发生弹性相互作用后反弹回来。相比之下，二次电子来自于样品的原子；它们是电子束和样品发生非弹性相互作用的结果。



扫描电子显微镜的不同信号及其形成区域

由于背散射电子来自样品的较深区域，而二次电子来自表面区域，因此他们反映的信息是不同的。背散射电子图像显示出其对原子序数高度敏感；原子序数越高，图像区域越亮。而二次电子成像则可以反映更详细的表面信息。



FeO₂ 颗粒的背散射电子像（左图）和二次电子像（右图）

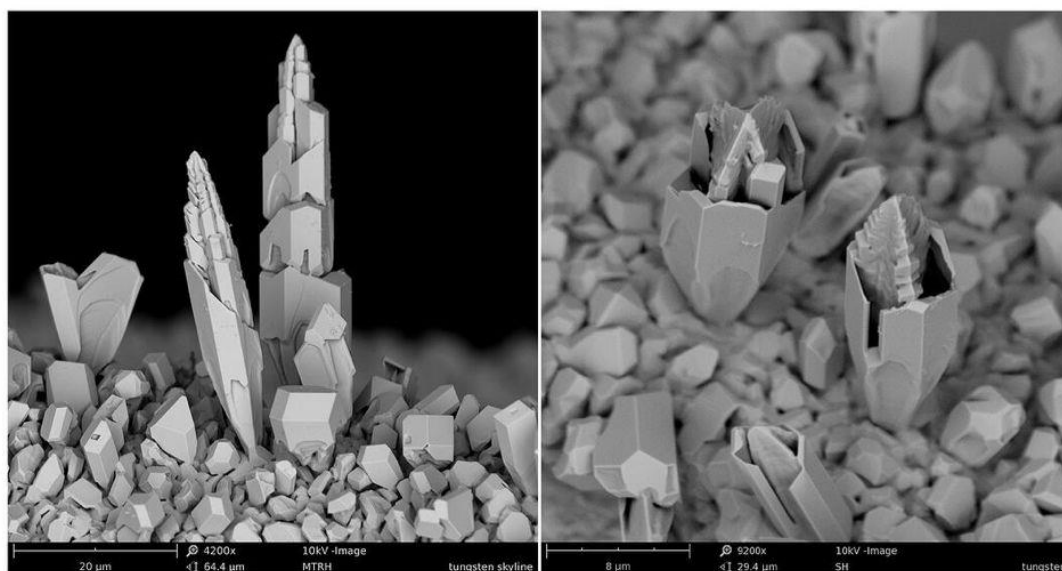
许多显微镜都广泛应用电子-物质相互作用而产生的 X 射线检测来分析样品

元素。任何材料都会产生具有特定能量的 X 射线；这种 X 射线就像材料的指纹。通过检测成分未知的样品发出的 X 射线能量，就有可能识别出样品中所包含的所有不同元素。

如何检测电子：背散射电子和二次电子的探测器是不同的。检测背散射电子，需要将固态探测器与电子束同心放置在样品上方，以最大程度地收集到背散射电子。

检测二次电子，主要是用 Eververt-Thornley 探测器。它由包含在法拉第笼之中的闪烁体探测器构成，法拉第笼带正电并吸引二次电子。然后闪烁体探测器用于加速吸入的电子并将其转变为光子，这些光子进入光电倍增管进行放大。二次电子探测器以一定角度放置在样品仓的侧面，以提高二次电子的检测效率。收集到的二次电子用来形成样品的 3D 图像，显示在 PC 显示器。

扫描电子显微镜：运行奇速，精确成像：正如您所能看到的，电子必须经历不同的过程才能在显示器上显示图像。当然，您不必等待电子完成这些过程；他们几乎是以纳秒的速度瞬间完成的。同时，为了获得高质量的图像，需要预先精确计算和控制电子经历的每一步。



钨颗粒的背散射电子图像

从寻找食物污染物到识别机器故障，再到预测飞机零件的腐蚀方式，能谱分析(EDX 或 EDS)是当今材料科学家广泛采用的技术。与扫描电子显微镜(SEM)一起使用时，EDX 探测器可以提供更多样品信息。

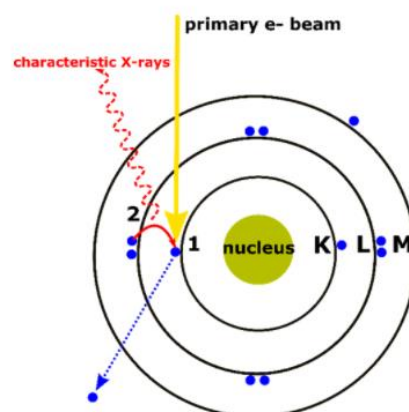
使用 EDX，研究人员可以快速得到有关样品化学成分的信息，包括元素构

成、分布及浓度。

但是 EDX 到底是如何工作的？：利用扫描电子显微镜，各种信号可以提供给定样品的不同信息。例如，背散射电子生成衬度图像，显示出原子序数差异。而二次电子则提供样品的表面形貌信息。当扫描电子显微镜与 EDX 探测器结合使用时，X 射线也可以用作产生化学信息的信号。

为了更好地理解 X 射线的产生原理，我们要清楚，每个原子都拥有特定数量的电子，且电子处于特定的能级。正常情况下，电子在特定的轨道上运行且具有不同的、分立的能量。

EDX 分析原理：电子束轰击原子内层，激发出基态原子的内壳电子，在内层留下带正电的电子空穴。内层电子离开原子后，处于较高能级的外层电子会填充这些低能级的空穴，多余能量可能会以 X 射线形式放出，而这种 X 射线的能量分布可以反映特定元素和跃迁特征。



X 射线生成过程：

- (1) 能量传递给原子中的电子，使其离开原子留下空穴；
- (2) 较高能级的外层电子填充空穴并释放出特性 X 射线。

此种 X 射线可以用硅漂移探测器收集，并结合软件对其进行测量和解释。化学信息可以通过元素面分布和线扫描等多种方式实现可视化。这样，利用 X 射线也就可以识别样品中的各种元素。

有趣的是，EDX 还可用于定性和定量分析，也就是识别样品的元素类型以及每种元素的浓度百分比。与传统扫描电子显微镜一样，EDX 技术几乎不需要样品制备，并且无损，不会损坏样品。

EDX 分析以其多种优势，已在制造业、研究领域、能源资源管理、快消品等

多个行业得到广泛应用。EDX 已经成为扫描电子显微镜的重要部分，利用扫描电子显微镜进行 EDX 分析，研究人员既可以提高分析结果质量，同时又能节省宝贵的时间。