

1. 光学显微镜以可见光为介质，电子显微镜以电子束为介质，由于电子束波长远较可见光小，故电子显微镜分辨率远比光学显微镜高。光学显微镜放大倍率最高只有约 1500 倍，扫描式显微镜可放大到 10000 倍以上。

2. 根据 de Broglie 波动理论，电子的波长仅与加速电压有关：

$$\lambda = h / mv = h / (2mqV)^{1/2} = 12.2 / (V)^{1/2} (\text{Å})$$

在 10 kV 的加速电压之下，电子的波长仅为 0.12Å，远低于可见光的 4000 - 7000Å，所以电子显微镜分辨率自然比光学显微镜优越许多，但是扫描式电子显微镜的电子束直径大多在 50-100Å 之间，电子与原子核的弹性散射 (Elastic Scattering) 与非弹性散射 (Inelastic Scattering) 的反应体积又会比原有的电子束直径增大，因此一般穿透式电子显微镜的分辨率比扫描式电子显微镜高。

3. 扫描式显微镜有一重要特色是具有超大的景深(depth of field)，约为光学显微镜的 300 倍，使得扫描式显微镜比光学显微镜更适合观察表面起伏程度较大的样品。

4. 扫描式电子显微镜，其系统设计由上而下，由电子枪 (Electron Gun) 发射电子束，经过一组磁透镜聚焦 (Condenser Lens) 聚焦后，用遮蔽孔径 (Condenser Aperture) 选择电子束的尺寸(Beam Size)后，通过一组控制电子束的扫描线圈，再透过物镜 (Objective Lens) 聚焦，打在样品上，在样品的上侧装有讯号接收器，用以择取二次电子 (Secondary Electron) 或背向散射电子 (Backscattered Electron) 成像。

5. 电子枪的必要特性是亮度要高、电子能量散布 (Energy Spread) 要小，目前常用的种类计有三种，钨(W)灯丝、六硼化镧(LaB6)灯丝、场发射 (Field Emission)，不同的灯丝在电子源大小、电流量、电流稳定度及电子源寿命等均有差异。

6. 热游离方式电子枪有钨(W)灯丝及六硼化镧(LaB6)灯丝两种，它是利用高温使电子具有足够的能量去克服电子枪材料的功函数(work function)能障而逃离。对发射电流密度有重大影响的是温度和功函数，但因操作电子枪时均希望能以最低的温度来操作，以减少材料的挥发，所以在操作温度不提高的状况下，就需采用低功函数的材料来提高发射电流密度。

7. 价钱最便宜使用最普遍的是钨灯丝，以热游离 (Thermionization) 式来发射电子，电

子能量散布为 2 eV, 钨的功函数约为 4.5eV, 钨灯丝系一直径约 100 μ m, 弯曲成 V 形的细线, 操作温度约 2700K, 电流密度为 1.75A/cm², 在使用中灯丝的直径随着钨丝的蒸发变小, 使用寿命约为 40~80 小时。

8. 六硼化镧(LaB6)灯丝的功函数为 2.4eV, 较钨丝为低, 因此同样的电流密度, 使用 LaB6 只要在 1500K 即可达到, 而且亮度更高, 因此使用寿命便比钨丝高出许多, 电子能量散布为 1 eV, 比钨丝要好。但因 LaB6 在加热时活性很强, 所以必须在较好的真空环境下操作, 因此仪器的购置费用较高。

9. 场发射式电子枪则比钨灯丝和六硼化镧灯丝的亮度又分别高出 10 - 100 倍, 同时电子能量散布仅为 0.2 - 0.3 eV, 所以目前市售的高分辨率扫描式电子显微镜都采用场发射式电子枪, 其分辨率可高达 1nm 以下。

10. 场发射电子枪可细分成三种:冷场发射式(cold field emission , FE), 热场发射式(thermal field emission ,TF), 及肖基发射式(Schottky emission ,SE)

11. 当在真空中的金属表面受到 108V/cm 大小的电子加速电场时, 会有可观数量的电子发射出来, 此过程叫做场发射, 其原理是高电场使电子的电位障碍产生 Schottky 效应, 亦即使能障宽度变窄, 高度变低, 因此电子可直接"穿隧"通过此狭窄能障并离开阴极。场发射电子系从很尖锐的阴极尖端所发射出来, 因此可得极细而又具高电流密度的电子束, 其亮度可达热游离电子枪的数百倍, 或甚至千倍。

12. 场发射电子枪所选用的阴极材料必需是高强度材料, 以能承受高电场所加诸在阴极尖端的高机械应力, 钨即因高强度而成为较佳的阴极材料。场发射枪通常以上下一组阳极来产生吸取电子、聚焦、及加速电子等功能。利用阳极的特殊外形所产生的静电场, 能对电子产生聚焦效果, 所以不再需要韦氏罩或栅极。第一(上)阳极主要是改变场发射的拔出电压(extraction voltage), 以控制针尖场发射的电流强度, 而第二(下)阳极主要是决定加速电压, 以将电子加速至所需要的能量。

13. 要从极细的钨针尖场发射电子, 金属表面必需完全干净, 无任何外来材料的原子或分子在其表面, 即使只有一个外来原子落在表面亦会降低电子的场发射, 所以场发射电子枪必需保持超高真空度, 来防止钨阴极表面累积原子。由于超高真空设备价格极为高昂, 所以一般除非需要高分辨率 SEM, 否则较少采用场发射电子枪。

14. 冷场发射式最大的优点为电子束直径最小，亮度最高，因此影像分辨率最优。能量散布最小，故能改善在低电压操作的效果。为避免针尖被外来气体吸附，而降低场发射电流，并使发射电流不稳定，冷场发射式电子枪必需在 10^{-10} torr 的真空度下操作，虽然如此，还是需要定时短暂加热针尖至 2500K(此过程叫做 flashing)，以去除所吸附的气体原子。它的另一缺点是发射的总电流最小。

15. 热场发射式电子枪是在 1800K 温度下操作，避免了大部份的气体分子吸附在针尖表面，所以免除了针尖 flashing 的需要。热式能维持较佳的发射电流稳定度，并能在较差的真空度下(10^{-9} torr)操作。虽然亮度与冷式相类似，但其电子能量散布却比冷式大 3~5 倍，影像分辨率较差，通常较不常使用。

16. 肖基发射式的操作温度为 1800K，它系在钨(100)单晶上镀 ZrO 覆盖层，ZrO 将功函数从纯钨的 4.5eV 降至 2.8eV，而外加高电场更使电位障壁变窄变低，使得电子很容易以热能的方式跳过能障(并非穿隧效应)，逃出针尖表面，所需真空度约 10^{-8} ~ 10^{-9} torr。其发射电流稳定度佳，而且发射的总电流也大。而其电子能量散布很小，仅稍逊于冷场发射式电子枪。其电子源直径比冷式大，所以影像分辨率也比冷场发射式稍差一点。

17. 场发射放大倍率由 25 倍到 650000 倍，在使用加速电压 15kV 时，分辨率可达到 1nm，加速电压 1kV 时，分辨率可达到 2.2nm。一般钨丝型的扫描式电子显微镜仪器上的放大倍率可到 200000 倍，实际操作时，大部份均在 20000 倍时影像便不清楚了，但如果样品的表面形貌及导电度合适，最大倍率 650000 倍是可以达成的。

18. 由于对真空的要求较高，有些仪器在电子枪及磁透镜部份配备了 3 组离子泵(ion pump)，在样品室中，配置了 2 组扩散泵(diffusion pump)，在机体外，以 1 组机械泵负责粗抽，所以有 6 组大小不同的真空泵来达成超高真空的要求，另外在样品另有以液态氮冷却的冷阱(cold trap)，协助保持样品室的真空度。

19. 平时操作，若要将样品室真空亦保持在 10^{-8} pa(10^{-10} torr)，则抽真空的时间将变长而降低仪器的便利性，更增加仪器购置成本，因此一些仪器设计了阶段式真空(step vacuum)，亦即使电子枪、磁透镜及样品室的真空度依序降低，并分成三个部份来读取真空计读数，如此可将样品保持在真空度 10^{-5} pa 的环境下即可操作。平时待机或更换样品时，为防止电子枪污染，皆使用真空阀(gun valve)将电子枪及磁透镜部份与样品室隔离，实际观察时再打开使电子束通过而打击到样品。

20. 场发射式电子枪的电子产生率与真空度有密切的关系，其使用寿命也随真空度变差

而急剧缩短，因此在样品制备上必须非常注意水气，或固定用的碳胶或银胶是否烤干，以免在观察的过程中，真空陡然变差而影响灯丝寿命，甚至系统当机。

21. 在电子显微镜中须考虑到的像差(aberration)包括:衍射像差(diffraction aberration)、球面像差(spherical aberration)、散光像差(astigmatism)及波长散布像差(即色散像差,chromatic aberration)。

22. 面像差为物镜中主要缺陷，不易校正，因偏离透镜光轴之电子束偏折较大，其成像点较沿轴电子束成像之高斯成像平面(Gauss image plane)距透镜为近。

23. 散光像差由透镜磁场不对称而来，使电子束在二互相垂直平面之聚焦落在不同点上。散光像差一般用散光像差补偿器(stigmator)产生与散光像差大小相同、方向相反的像差校正，目前电子显微镜其聚光镜及物镜各有一组散光像差补偿器。

24. 光圈衍射像差(Aperture diffraction):由于电子束通过小光圈电子束产生衍射现象，使用大光圈可以改善。

25. 色散像差(Chromatic aberration):因通过透镜电子束能量差异，使得电子束聚焦后并不在同一点上。

26. 电子束和样品作用体积(interaction volume)，作用体积约有数个微米(μm)深，其深度大过宽度而形状类似梨子。此形状乃源于弹性和非弹性碰撞的结果。低原子量的材料，非弹性碰撞较可能，电子较易穿进材料内部，较少向边侧碰撞，而形成梨子的颈部，当穿透的电子丧失能量变成较低能量时，弹性碰撞较可能，结果电子行进方向偏向侧边而形成较大的梨形区域。

27. 在固定电子能量时，作用体积和原子序成反比，乃因弹性碰撞之截面积和原子序成正比，以致电子较易偏离原来途径而不能深入样品。

28. 电子束能量越大，弹性碰撞截面积越小，电子行走路径倾向直线而可深入样品，作用体积变大。

29. 电子束和样品的作用有两类，一为弹性碰撞，几乎没有损失能量，另一为非弹性碰撞，入射电子束会将部份能量传给样品，而产生二次电子、背向散射电子、俄歇电子、X光、长波电磁放射、电子-空位对等。这些信号可供 SEM 运用者有二次电子、背向散射电子、X光、阴极发光、吸收电子及电子束引起电流(EBIC) 等。

30. 二次电子(Secondary Electrons): 电子束和样品作用，可将传导能带(conduction band)的电子击出，此即为二次电子，其能量约 $< 50\text{eV}$ 。由于是低能量电子，所以只有在距离样品表面约 $50\sim 500\text{\AA}$ 深度范围内所产生之二次电子，才有机会逃离样品表面而被侦测到。由于二次电子产生的数量，会受到样品表面起伏状况影响，所以二次电子影像可以观察到样品表面之形貌特征。

31. 背向散射电子(Backscattered Electrons): 入射电子与样品子发生弹性碰撞，而逃离样品表面的高能量电子，其动能等于或略小于入射电子的能量。背向散射电子产生的数量，会因样品元素种类不同而有差异，样品中平均原子序越高的区域，释放出来的背向散射电子越多，背向散射电子影像也就越亮，因此背向散射电子影像有时又称为原子序对比影像。由于背向散射电子产生于距样品表面约 5000\AA 的深度范围内，由于入射电子进入样品内部较深，电子束已被散射开来，因此背向散射电子影像分辨率不及二次电子影像。

32. X光: 入射电子和样品进行非弹性碰撞可产生连续 X光和特征 X光，前者系入射电子减速所放出的连续光谱，形成背景决定最少分析之量，后者系特定能阶间之能量差，可藉以分析成分元素。

33. 电子束引致电流(Electron-beam induced Current, EBIC): 当一个 p-n 界面(Junction)经电子束照射后，会产生过多的电子-空位对，这些载子扩散时被 p-n 界面的电场收集，外加线路时即会产生电流。

34. 阴极发光(Cathodoluminescence): 当电子束产生之电子-空位对再结合时，会放出各种波长电磁波，此为阴极发光(CL)，不同材料发出不同颜色之光。

35. 样品电流(Specimen Current): 电子束射到样品上时，一部份产生二次电子及背向散射电子，另一部份则留在样品里，当样品接地时即产生样品电流。

36. 电子侦测器有两种，一种是闪烁计数器侦测器(Scintillator)，常用于侦测能量较低的二次电子，另一种是固态侦测器(solid state detector)，则用于侦测能量较高的反射电子。

37. 影响电子显微镜影像品质的因素:

- A. 电子枪的种类:使用场发射、LaB6 或钨丝的电子枪。
- B. 电磁透镜的完美度。
- C. 电磁透镜的型式: In-lens ,semi in-lens, off-lens
- D. 样品室的洁净度: 避免粉尘、水气、油气等污染。
- E. 操作条件: 加速电压、工作电流、仪器调整、样品处理、真空度。
- F. 环境因素: 振动、磁场、噪音、接地。

38. 如何做好 SEM 的影像, 一般由样品的种类和所要的结果来决定观察条件, 调整适当的加速电压、工作距离 (WD)、适当的样品倾斜, 选择适当的侦测器、调整合适的电子束电流。

39. 一般来说, 加速电压提高, 电子束波长越短, 理论上, 只考虑电子束直径的大小, 加速电压愈大, 可得到愈小的聚焦电子束, 因而提高分辨率, 然而提高加速电压却有一些不可忽视的缺点:

- A. 无法看到样品表面的微细结构。
- B. 会出现不寻常的边缘效应。
- C. 电荷累积的可能性增高。

D. 样品损伤的可能性增高。

因此适当的加速电压调整，才可获得最清晰的影像。

40. 适当的工作距离的选择，可以得到最好的影像。较短的工作距离，电子讯号接收较佳，可以得到较高的分辨率，但是景深缩短。较长的工作距离，分辨率较差，但是影像景深较长，表面起伏较大的样品可得到较均匀清晰的影像。

41. SEM 样品若为金属或导电性良好，则表面不需任何处理，可直接观察。若为非导体，则需镀上一层金属膜或碳膜协助样品导电，膜层应均匀无明显特征，以避免干扰样品表面。金属膜较碳膜容易镀，适用于 SEM 影像观察，通常为 Au 或 Au-Pd 合金或 Pt。而碳膜较适于 X 光微区分析，主要是因为碳的原子序低，可以减少 X 光吸收。

42. SEM 样品制备一般原则为:

A. 显露出所欲分析的位置。

B. 表面导电性良好，需能排除电荷。

C. 不得有松动的粉末或碎屑(以避免抽真空时粉末飞扬污染镜柱体)。

D. 需耐热，不得有熔融蒸发的现象。

E. 不能含液状或胶状物质，以免挥发。

F. 非导体表面需镀金(影像观察)或镀碳(成份分析)。

43. 镀导电膜的选择，在放大倍率低于 1000 倍时，可以镀一层较厚的 Au，以提高导电度。放大倍率低于 10000 倍时，可以镀一层 Au 来增加导电度。放大倍率低于 100000 倍时，可以镀一层 Pt 或 Au-Pd 合金，在超过 100000 时，以镀一层超薄的 Pt 或 Cr 膜较佳。

44. 电子束与样品作用，当内层电子被击出后，外层电子掉入原子内层电子轨道而放出 X 光，不同原子序，不同能阶电子所产生的 X 光各不相同，称为特征 X 光，分析特征 X 光，可分析样品元素成份。

45. 分析特征 X 光的方式，可分析特征 X 光的能量分布，称为 EDS，或分析特征 X 光的波长，称为 WDS。X 光能谱的分辨率，在 EDS 中约有 100~200eV 的分辨率，在 WDS 中则有 5~10eV 的分辨率。由于 EDS 的分辨率较 WDS 差，因此在能谱的解析上，较易产生重迭的情形。

46. 由于电子束与样品作用的作用体积(interaction volume)的关系，特征 X 光的产生和作用体积的大小有关，因此在平面的样品中，EDS 或 WDS 的空间分辨率，受限于作用体积的大小。