



## 材料科学与工程学院

# 第二章 扫描电子显微镜 (SEM)

王庆平



工程学院



## 2.1 引言

扫描电子显微镜的设计思想和工作原理，早在1935年便已被提出来了。1942年，英国首先制成一台实验室用的扫描电镜，但由于成像的分辨率很差，照相时间太长，所以实用价值不大。经过各国科学工作者的努力，尤其是随着电子工业技术水平的不断发展，到1965年制造出了第一台商品扫描电镜。自其问世以来，得到了迅速的发展，种类不断增多，性能日益提高，并且已广泛地应用在材料、生物学、医学、冶金学等学科的领域中，促进了各有关学科的发展。

扫描电子显微镜发展历史 - 知乎  
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/68538340>

材料科学与工程学院



材料科学与工程学院



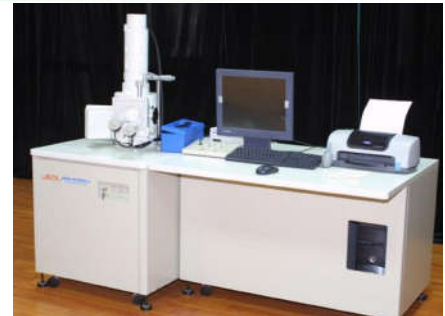
## 主要内容 CONTENTS

- 引言
- 扫描电镜结构与工作原理
- 扫描电镜成像的物理信号
- 扫描电镜的主要性能
- 扫描电镜图象及衬度
- 扫描电镜试样的制备
- 小结

材料科学与工程学院



## JEOL扫描电子显微镜



材料科学与工程学院



## JSM-6301F场发射枪扫描电镜



材料科学与工程学院



7



材料科学与工程学院



## 飞纳台式场发射电镜



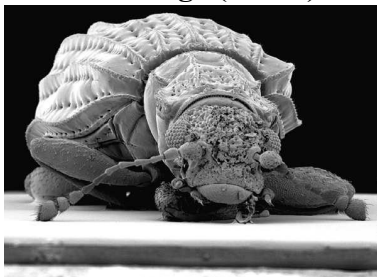
放大倍数：1,000,000 X  
分辨率：优于 2.2 nm  
灯丝材料：钨钨钨钨钨钨钨  
抽真空时间：小于 15 秒  
探测器：二次电子探测器（选配二次电子探测器），能量探测器

材料科学与工程学院



9

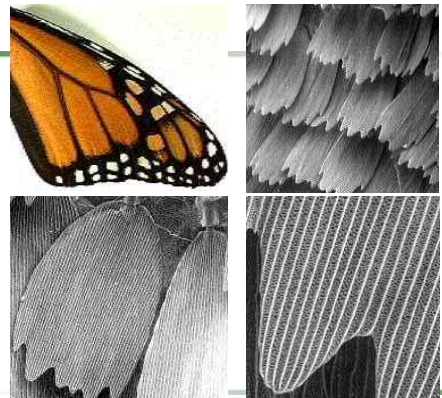
## SEM image (beetle)



材料科学与工程学院



10



材料科学与工程学院



11

## 扫描电子显微镜

## 2.1 引言

扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope)

简称扫描电镜或**SEM**，它是以类似电视摄影显像的方式利用细聚焦电子束在样品表面扫描时激发出来的各种物理信号来调制成像的。

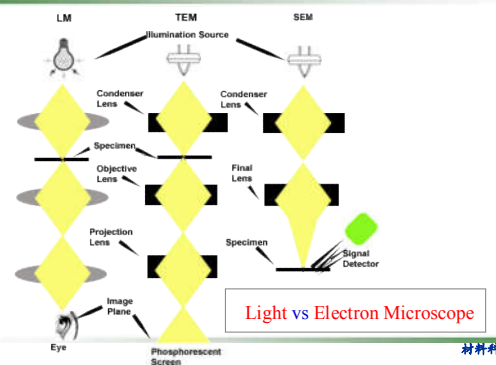
新式SEM的二次电子像的分辨率已达到3-4nm，放大倍数可以从**数倍放大到20万倍左右**。

由于扫描电镜的景深远比光学显微镜大，可以用它进行显微断口分析。

材料科学与工程学院



## 2.1 引言



材料科学与工程学院



## 2.1 引言

### 扫描电镜特点

- 仪器分辨本领较高。二次电子像分辨本领可达1.0nm(场发射), 3.0nm(钨灯丝);
- 仪器放大倍数变化范围大(从几倍到几十万倍), 且连续可调;
- 图像景深大, 富有立体感。可直接观察起伏较大的粗糙表面(如金属和陶瓷的断口等);
- **试样制备简单**。只要将块状或粉末的、导电的或不导电的试样不加处理或稍加处理, 就可直接放到SEM中进行观察。一般来说, **比透射电子显微镜(TEM)的制样简单**, 且可使图像更近于试样的真实状态;

材料科学与工程学院



## 2.1 引言

- 可做综合分析。  
SEM装上波长色散X射线谱仪(WDX)(简称波谱仪)或能量色散X射线谱仪(EDX)(简称能谱仪)后, 在观察扫描形貌图像的同时, 可对试样微区进行元素分析。
- 装上不同类型的试样台和检测器可以直接观察处于不同环境(加热、冷却、拉伸等)中的试样显微结构形态的动态变化过程(动态观察)。



材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理

### 2.2.1 SEM的结构

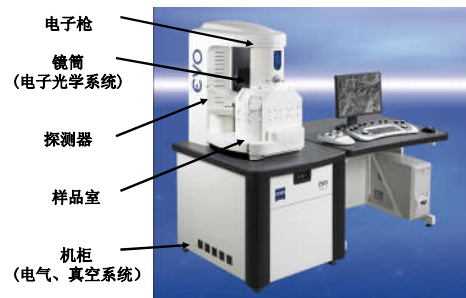


材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理

### 2.2.1 SEM的结构



材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理

### 2.2.1 SEM的结构

- 扫描电镜 {
- a. 电子光学系统
  - b. 信号收集处理, 图像显示和记录系统
  - c. 真空系统

#### (1) 电子光学系统(镜筒)

- 电子枪
- 电磁透镜
- 扫描线圈
- 样品室

作用是用来获得很细的电子束(直径约几个nm), 作为产生物理信号的激发源。

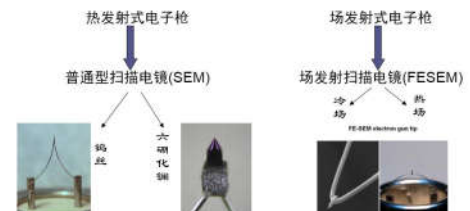
材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理

### a. 电子枪

★作用: 利用阴极与阳极灯丝间的高压产生高能量的电子束。



电子枪的类型

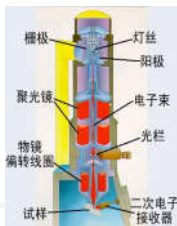
材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理

### b. 电磁透镜

★聚光镜作用：主要是把电子枪的束斑（虚光源）逐级聚焦缩小，使原来直径约为 $50\mu\text{m}$ 的束斑缩小成只有几个nm的细小束斑。为了达到目的，可选用几个透镜来完成，一般选用3个。



材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理



### c. 扫描线圈

★作用：使电子束偏转，并在样品表面做有规则的扫描；即提供入射电子束在样品表面及阴极射线管内电子束在荧光屏上的同步扫描信号。

### d. 样品室

★主要部件是样品台。它能夹持一定尺寸的样品，并能使样品进行三维空间的移动，还能倾斜和转动，以利于对样品上每一特定位置进行各种分析。

材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理



### (2) 信号收集处理，图像显示和记录系统

作用：收集(探测)样品在入射电子束作用下产生的各种物理信号，并进行放大；将信号检测放大系统输出的调制信号转换为能显示在阴极射线管荧光屏上的图像，供观察或记录。

材料科学与工程学院



## 2.2 SEM的构造和工作原理



### (3) 真空系统

★作用：保证电子光学系统正常工作，防止样品污染，避免灯丝寿命快速下降。

★需要提供高的真空度，一般情况下要求保持 $10^{-4}$ ~ $10^{-5}\text{mmHg}$ 的真空度。

材料科学与工程学院

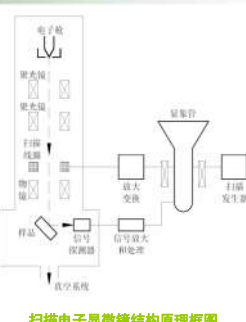


## 2.2 SEM的构造和工作原理



扫描电镜的成像原理，和透射电镜大不相同，它不是用电磁透镜放大成像，而是逐点逐行扫描成像。

- 由电子枪发射出来的电子束，在加速电压作用下，经过2-3个电磁透镜聚焦后，会聚成一个细的电子束。在末级透镜上边装有扫描线圈，在它的作用下电子束在样品表面按顺序逐行进行扫描。
- 高能电子束与样品物质的交互作用，激发样品产生各种物理信号，如二次电子、背散射电子、吸收电子、X射线、俄歇电子和透射电子等。其强度随样品表面特征而变化。
- 这些物理信号分别被相应的收集器接受，经放大器按顺序、成比例地放大后，送到显像管，调制显像管的亮度。



扫描电子显微镜结构原理图

材料科学与工程学院



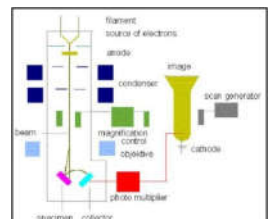
## 2.2 SEM的构造和工作原理



- 供给电子光学系统使电子束偏向的扫描线圈的电源也是供给阴极射线显像管的扫描线圈的电源，此电源发出的锯齿波信号同时控制两束电子束作同步扫描。

因此，样品上电子束的位置与显像管荧光屏上电子束的位置是一一对应的。

- 扫描电镜就是这样采用逐点成像的方法，把样品表面不同的特征，按顺序、成比例地转换为视频信号，完成一帧图像，从而使我们在荧光屏上得到与样品表面特征相对应的图像——某种信息图，如二次电子像、背散射电子像等。画面上亮度的疏密程度表示该信息的强弱分布。



材料科学与工程学院

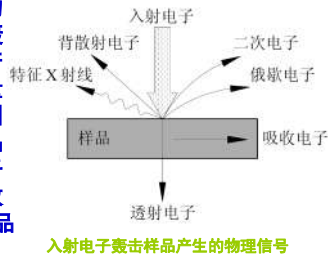




## 2.3扫描电镜成像的物理信号



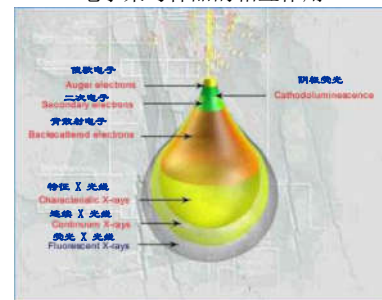
- 扫描电镜成像所用的物理信号是电子束轰击固体样品而激发产生的。具有一定能量的电子，当其入射固体样品时，将与样品内原子核和核外电子发生弹性和非弹性散射过程，激发固体样品产生多种物理信号。



## 2.3扫描电镜成像的物理信号



### 电子束与样品的相互作用



## 2.3扫描电镜成像的物理信号



### 不同信号的用途

图像	信号	探测器	用途
SE (二次电子像)	二次电子	ETSE, VPSE, EPSE	表面形貌
BSE (背散射电子像)	背散射电子	BSD	成分形貌
EDS (能谱)	X-ray	能谱仪	元素分析
WDS (波谱)	X-ray	波谱仪	高精度元素分析
EBSd(背散射电子衍射)	背散射电子衍射	Phosphor Screen CCD	晶粒取向 晶面取向
CL (荧光)	阴极荧光	PMT 或 PbS	半导体及绝缘体缺陷或杂质



## (1) 背散射电子

### (backscattering electron)

- 背散射电子是指被固体样品中的原子反弹回来的一部分入射电子。
- 其中包括弹性背散射电子和非弹性背散射电子。
- 弹性背散射电子是指被样品中原子核反弹回来的散射角大于90°的那些入射电子，其能量基本上没有变化。
- 弹性背散射电子的能量为数千到数万电子伏。
- 非弹性背散射电子是入射电子和核外电子撞击后产生非弹性散射而造成的，不仅能量变化，方向也发生变化。
- 如果有些电子经多次散射后仍能反弹出样品表面，这就形成非弹性背散射电子。



## (1) 背散射电子

### (backscattering electron)

- 非弹性背散射电子的能量分布范围很宽，从数十电子伏到数千电子伏。
- 从数量上看，弹性背散射电子远比非弹性背散射电子所占的份额多。
- 背散射电子的产生范围在1000Å到1μm深，由于背散射电子的产额随原子序数的增加而增加，所以，利用背散射电子作为成像信号不仅能分析形貌特征，也可用来显示原子序数衬度，定性地进行成分分析。



## (2) 二次电子

### (secondary electron)

- 二次电子是指被入射电子轰击出来的核外电子。
- 由于原子核和外层价电子间的结合能很小，因此外层的电子比较容易和原子脱离。当原子的核外电子从入射电子获得了大于相应的结合能的能量后，可离开原子而变成自由电子。
- 如果这种散射过程发生在比较接近样品表层，那些能量尚大于材料逸出功的自由电子可从样品表面逸出，变成真空中的自由电子，即二次电子。
- 一个能量很高的入射电子射入样品时，可以产生许多自由电子，而在样品表面上方检测到的二次电子绝大部分来自价电子。



## (2) 二次电子

(secondary electron)

- 二次电子来自表面50-500Å的区域，能量为0-50eV。
- 它对试样表面状态非常敏感，能非常有效地显示试样表面形貌。
- 由于它发自试样表面层，入射电子还没有有较多次散射，因此产生二次电子的面积与入射电子的照射面积没多大区别。所以二次电子的分辨率较高，一般可达到50-100Å。
- 扫描电子显微镜的分辨率通常就是二次电子分辨率。二次电子产额随原子序数的变化不明显，它主要决定于表面形貌。

材料科学与工程学院



## (3) 吸收电子

(absorption electron)

- 入射电子进入样品后，经多次非弹性散射，能量损失殆尽（假定样品有足够厚度，没有透射电子产生），最后被样品吸收。
- 若在样品和地之间接入一个高灵敏度的电流表，就可以测得样品对地的信号，这个信号是由吸收电子提供的。
- 入射电子束与样品发生作用，若逸出表面的背散射电子或二次电子数量任一项增加，将会引起吸收电子相应减少，若把吸收电子信号作为调制图像的信号，则其衬度与二次电子像和背散射电子像的反差是互补的。

材料科学与工程学院



## (3) 吸收电子

(absorption electron)

- 入射电子束射入一含有多元素的样品时，由于二次电子产额不受原子序数影响，则产生背散射电子较多的部位其吸收电子的数量就较少。
- 因此，吸收电流像可以反映原子序数衬度，同样也可以用来进行定性的微区成分分析。

材料科学与工程学院



## (4) 透射电子

(transmission electron)

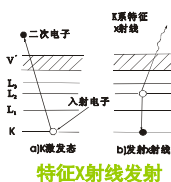
- 如果样品厚度小于入射电子的有效穿透深度（扫描透射操作方式下），那么就会有相当数量的入射电子能够穿过薄样品而成为透射电子。
- 透射电子信号是由微区的厚度、成分和晶体结构来决定。
- 一般金属薄膜样品（扫描透射操作方式下）的厚度在2000-5000 Å左右，在入射电子穿透样品的过程中将与原子核或核外电子发生有限次数的弹性或非弹性散射。因此，样品下方检测到的透射电子信号中，除了有能量与入射电子相当的弹性散射电子外，还有各种不同能量损失的非弹性散射电子。
- 其中有些特征能量损失ΔE的非弹性散射电子和分析区域的成分有关，因此，可以用特征能量损失电子配合电子能量分析器来进行微区成分分析。

材料科学与工程学院



## (5) 特征X射线

(characteristic X-ray)



- 特征X射线是原子的内层电子受到激发以后，在能级跃迁过程中直接释放的具有特征能量和波长的一种电磁波辐射。
- 如在高能入射电子作用下使K层电子逸出，原子就处于K激发态，具有能量 $E_K$ 。当一个 $L_2$ 层电子填补K层空位后，原子体系由K激发态变成L激发态，能量从 $E_K$ 降为 $E_{L_2}$ ，这时就有 $\Delta E = (E_K - E_{L_2})$ 的能量释放出来。

材料科学与工程学院



## (5) 特征X射线

(characteristic X-ray)

- 若这一能量以X射线形式放出，这就是该元素的 $K\alpha$ 辐射，此时X射线的波长为：
$$\lambda_K = \frac{hc}{E_K}$$
式中，h为普朗克常数，c为光速。对于每一元素， $E_K$ 、 $E_{L_2}$ 都有确定的特征值，所以发射的X射线波长也有特征值，这种X射线称为特征X射线。
- X射线的波长和原子序数之间服从莫塞莱定律：

式中，Z为原子序数，K、σ为常数。可以看出，原子序数和特征能量之间是有对应关系的，利用这一对应关系可以进行成分分析。如果用X射线探测器测到了样品微区中存在某一特征波长，就可以判定该微区中存在的相应元素。

材料科学与工程学院



## (6) 俄歇电子

### (Auger electron)

- 处于激发态的原子体系释放能量的另一形式是发射具有特征能量的俄歇电子。如果原子内层电子能级跃迁过程所释放的能量，仍大于包括空位层在内的邻近或较外层的电子临界电离激发能，则有可能引起原子再一次电离，发射具有特征能量的俄歇电子。
- 因每一种原子都有自己的特征壳层能量，所以它们的俄歇电子能量也各有特征值，一般在50-1500 eV范围之内。俄歇电子是由试样表面极有限的几个原子层中发出的，这说明俄歇电子信号适用于表层化学成分分析。
- 显然，一个原子中至少要有三个以上的电子才能产生俄歇效应，铍是产生俄歇效应的最轻元素。

材料科学与工程学院



## 其它物理信号

- 除了上述六种信号外，固体样品中还会产生例如阴极荧光、电子束感生效应等信号，这些信号经过调制后也可以用于专门的分析。

材料科学与工程学院



## 2.4 扫描电子显微镜的主要性能

- (1) 放大倍数 (magnification)
- (2) 分辨率 (resolution)
- (3) 景深 (depth of field / depth of focus)

材料科学与工程学院



## (1) 放大倍数

### (magnification)

- 当入射电子束作光栅扫描时，若电子束在样品表面扫描的幅度为 $A_s$ ，在荧光屏上阴极射线同步扫描的幅度为 $A_c$ ，则扫描电子显微镜的放大倍数为：

$$M = \frac{A_c}{A_s}$$

- 由于扫描电子显微镜的荧光屏尺寸是固定不变的，因此，放大倍率的变化是通过改变电子束在试样表面的扫描幅度 $A_s$ 来实现的。
- 目前大多数商品扫描电镜放大倍数为20-20000倍，介于光学显微镜和透射电镜之间。

材料科学与工程学院



## (2) 分辨率

### (resolution)

- 分辨率是扫描电子显微镜主要性能指标。  
★定义：对微区成分分析而言，它是指能分析的最小区域；对成像而言，它是指能分辨两点之间的最小距离。
- 这两者主要取决于入射电子束直径，电子束直径愈小，分辨率愈高。入射电子束束斑直径是扫描电镜分辨本领的极限。热阴极电子枪的最小束斑直径3 nm，场发射电子枪可使束斑直径小于1 nm。
- 但分辨率并不直接等于电子束直径，因为入射电子束与试样相互作用会使入射电子束在试样内的有效激发范围大大超过入射束的直径。

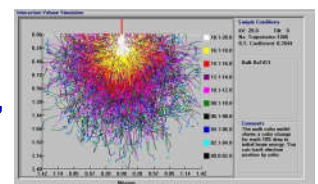
材料科学与工程学院



## (2) 分辨率

### (resolution)

- 在高能入射电子作用下，试样表面激发产生各种物理信号，用来调制荧光屏亮度的信号不同，则分辨率就不同。
- 电子进入样品后，作用区是一梨形区，激发的信号产生于不同深度



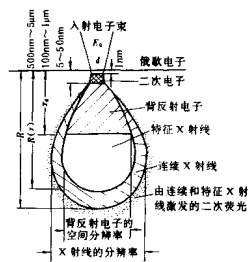
入射电子在样品中的扩展

材料科学与工程学院



## (2) 分辨率 (resolution)

- 俄歇电子和二次电子因其本身能量较低以及平均自由程很短，只能在样品的浅层表面内逸出。入射电子束进入浅层表面时，尚未向横向扩展开来，可以认为在样品上方检测到的俄歇电子和二次电子主要来自直径与扫描束斑相当的圆柱体内。
- 这两种电子的分辨率就相当于束斑的直径。

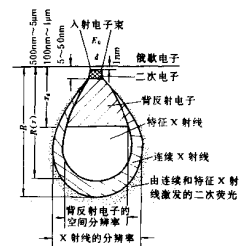


材料科学与工程学院



## (2) 分辨率 (resolution)

- 入射电子进入样品较深部位时，已经有了相当宽度的横向扩展，从这个范围中激发出来的背散射电子能量较高，它们可以从样品的较深部位处弹射出表面，横向扩展后的作用体积大小就是背散射电子的成像单元，所以，**背散射电子像分辨率要比二次电子像低**，一般为50~200nm。
- 扫描电镜的分辨率用二次电子像的分辨率表示。



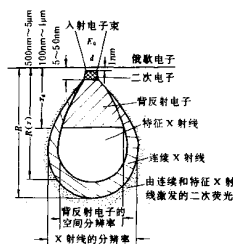
材料科学与工程学院



## (2) 分辨率 (resolution)

各种信号成像的分辨率

- 二次电子：5~10nm
- 背散射电子：50~200nm
- 俄歇电子：5~10nm
- 吸收电子：100~1000nm
- 特征X射线：100~1000nm



材料科学与工程学院



## (2) 分辨率 (resolution)

- 样品原子序数愈大，电子束进入样品表面的横向扩展愈大，分辨率愈低。
- 电子束射入重元素样品中时，作用体积不呈梨状，而是半球状。电子束进入表面后立即向横向扩展。即使电子束束斑很细小，也不能达到较高的分辨率，此时二次电子的分辨率和背散射电子的分辨率之间的差距明显变小。
- 电子束的束斑大小、调制信号的类型以及检测部位的原子序数是扫描电子显微镜分辨率的三大因素。
- 此外，影响分辨率的因素还有信噪比、杂散电磁场、机械振动等。

噪音干扰造成图像模糊；磁场的存在改变了二次电子运动轨迹，降低图像质量；机械振动引起电子束斑漂移，这些因素的影响都降低了图像分辨率。

材料科学与工程学院



## (3) 景深

(depth of field / depth of focus)

- 景深是指透镜对高低不平的试样各部位能同时聚焦成像的一个能力范围。
- 扫描电子显微镜的景深取决于分辨本领和电子束入射半角 $\beta$
- 电子束入射半角是控制景深的主要因素，它取决于末级透镜的光阑直径和工作距离。扫描电子显微镜 $\beta$ 角很小（约 $10^{-3}$  rad），所以景深很大。
- 扫描电镜以景深大而著名。它比一般光学显微镜景深大100~500倍，比透射电子显微镜的景深大10倍。

$$D_s = \frac{2\Delta R_0}{\tan \beta} \approx \frac{2\Delta R_0}{\beta}$$

景深的依赖关系

材料科学与工程学院



## (3) 景深

(depth of field / depth of focus)

表 4-7 扫描电镜和光学显微镜的景深 ( $\alpha_c = 10^{-3}$  rad)

放大倍数 M	分辨率 $d_0/\mu\text{m}$	景深 F/ $\mu\text{m}$	
		扫描电镜	光学显微镜
20	5	5000	5
100	1	1000	2
1000	0.1	100	0.7
5000	0.02	20	—
10000	0.01	10	—

材料科学与工程学院





## 2.5 SEM的成像衬度

### 分 { 二次电子像衬度 背散射电子像衬度

**衬度：**电子像的明暗程度取决于电子束的强弱，当两个区域中的电子强度不同时将出现图像的明暗差异，这种差异就是衬度。

**形貌衬度：**由于试样表面形貌差别而形成的衬度。

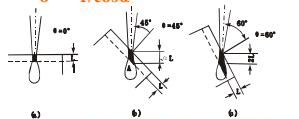
**成分衬度：**由于试样表面不同部位原子序数不同而形成的衬度。



### 二次电子产率 $\delta$ 与电子束入射角度的关系

若设 $\alpha$ 为入射电子束与试样表面法线之间的夹角，实验证明，当对光滑试样表面、入射电子束能量大于1kV且固定不变时，二次电子产率 $\delta$ 与 $\alpha$ 的关系为

$$\delta \propto 1/\cos\alpha$$



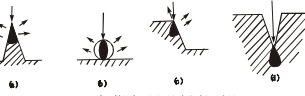
二次电子产率  $\delta$  与  $\alpha$  的关系

• 入射电子束与试样表面法线间夹角愈大，二次电子产率愈大



## 2.5 SEM的成像衬度

- 实际样品表面的形貌要复杂得多，但形成二次电子像衬度的原理是相同的。
- 实际样品可以被看作是由许多位向不同的小平面组成的。入射电子束的方向是固定的，但由于试样表面凹凸不平，因此它对试样表面不同处的入射角也是不同的。因而在荧光屏上反映出不同的衬度。



实际样品中二次电子产率及过程示意图

- 突出的尖棱、小粒子、比较陡的斜面处的图像亮度较大；
- 平面的亮度较低；
- 深的凹槽底部虽然能产生较多的二次电子，但不易被检测器收集到，因此槽底的衬度较暗。



## 2.5 SEM的成像衬度

### 2.5.1 二次电子像衬度

#### (1) 二次电子成像原理

**a. 二次电子：**在入射电子束作用下被轰击出来并离开样品表面的核外电子。

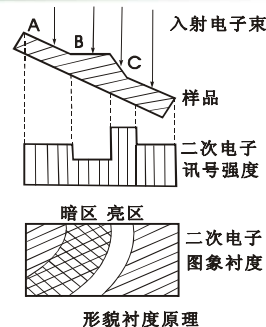
**b. 二次电子的性质：**主要来自样品表层5-10nm深度范围，当大于10nm时，能量较低(小于50eV)，且自由程较短，不能逸出样品表面，最终被样品吸收。

**c. 二次电子的数量和原子序数没有明显的关系，对样品微区表面的几何形状十分敏感。**



### 形貌衬度原理

- $\alpha$  越大， $\delta$  越高，反映到显像管荧光屏上就越亮。
- 以右图样品上A区和B区为例，A区中由于 $\alpha$ 大，发射的二次电子多，而B区由于 $\alpha$ 小，发射的二次电子少。
- 所以A区的信号强度较B区的信号大，故在图像上A区也较B区亮。

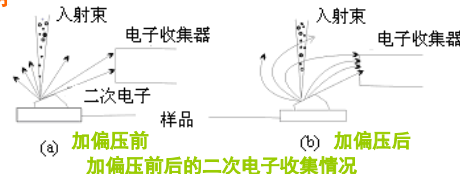


形貌衬度原理



## 2.5 SEM的成像衬度

在电子收集器的栅网上加上+250V的偏压，可以使低能二次电子走弯曲轨道到达电子收集器，这不仅增大了有效收集立体角，提高了二次电子信号强度，而且使得背向收集器的那些区域产生的二次电子，仍有相当一部分可以通过弯曲的轨道到达收集器，有利于显示背向收集器的样品区域细节，而不致形成“阴影”。



加偏压前 加偏压后  
加偏压前后的二次电子收集情况



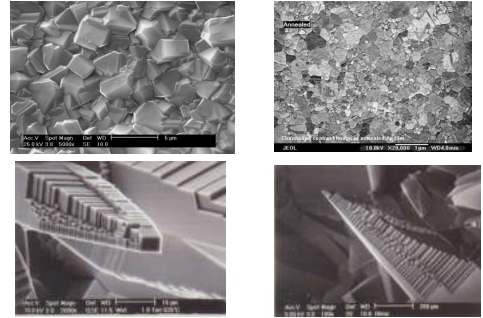
## 表面形貌衬度的应用

- 基于二次电子像（表面形貌衬度）的**分辨率比较高且不易形成阴影**等诸多优点，使其成为扫描电镜应用最广的一种方式，尤其在失效工件的断口检测、磨损表面观察以及各种材料形貌特征观察上，已成为目前最方便、最有效的手段。

材料科学与工程学院



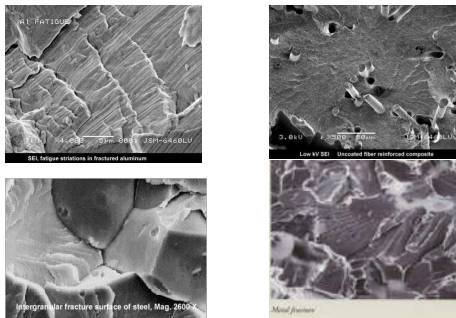
## (1)材料表面形态（组织）观察



材料科学与工程学院



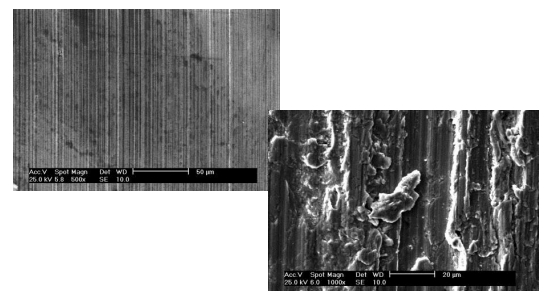
## (2)断口形貌观察



材料科学与工程学院



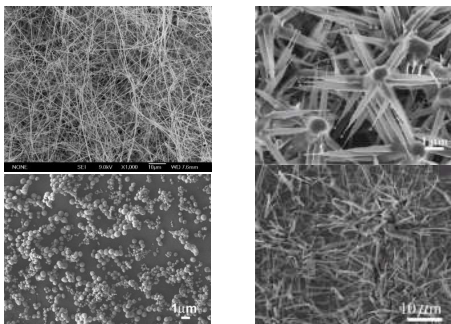
## (3)磨损表面形貌观察



材料科学与工程学院



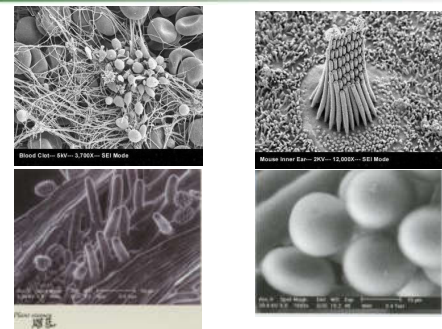
## (4)纳米结构材料形态观察



材料科学与工程学院



## (5)生物样品的形貌观察



材料科学与工程学院

6  
1

## 2.5 SEM的成像衬度

二次电子像衬度的特点:

- (1) 分辨率高;
- (2) 立体感强;
- (3) 主要反应形貌衬度。

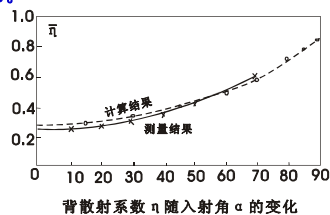


材料科学与工程学院



## 2.5 SEM的成像衬度

背散射电子信号也可以用来显示样品表面形貌，但它对表面形貌的变化不那么敏感，背散射电子像分辨率不如二次电子像高，有效收集立体角小，信号强度低，尤其是背向收集器的那些区域产生的背散射电子不能到达收集器，在图像上形成阴影，掩盖了那里的细节。

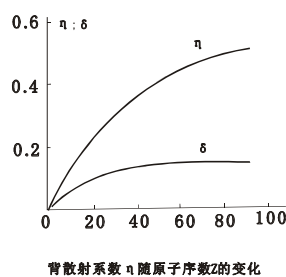


材料科学与工程学院



## (I) 背散射电子像衬度

- 背散射电子信号强度随原子序数 $Z$ 增大而增大
- 样品表面上平均原子序数较高的区域，产生较强的信号，在背散射电子像上显示较亮的衬度
- 因此，可以根据背散射电子像衬度来判断相应区域原子序数的相对高低。



材料科学与工程学院

6  
2

## 2.5 SEM的成像衬度



### 2.4.2 背散射电子像衬度

(1)背散射电子成像原理

**a.背散射电子:** 是被固体样品中的原子核反弹回来的一部分电子。

**b.** 背射电子信号既可以用来显示形貌衬度，也可以用来显示成分衬度。

**c.** 背散射电子产额对原子序数十分敏感。(Z<40)

材料科学与工程学院



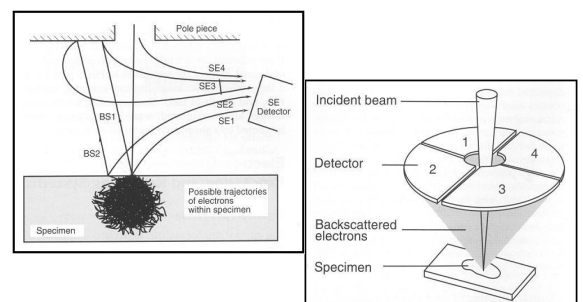
## 原子序数衬度原理及其应用

- **原子序数衬度**是由于试样表面物质原子序数(或化学成分)差别而形成的衬度。利用对**试样表面原子序数(或化学成分)**变化敏感的物理信号作为显像管的调制信号，可以得到原子序数衬度图像。
- **背散射电子像、吸收电子像**的衬度都含有原子序数衬度，而特征X射线像的衬度就是原子序数衬度。

材料科学与工程学院



## SE and BE

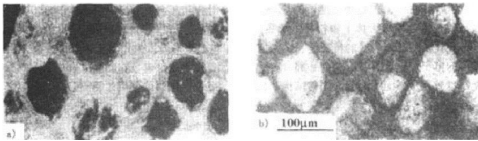


材料科学与工程学院



## (2) 吸收电子像衬度

- 吸收电子信号强度与二次电子及背散射电子的发射有关，若样品较厚，即  $\tau=0$ ，则  $\eta + \delta + \alpha = 1$ 。这说明，吸收电子像的衬度是与背散射电子像和二次电子像互补的。
- 因此，样品表面平均原子序数大的微区，背散射电子信号强度较高，而吸收电子信号强度较低，两者衬度正好相反。

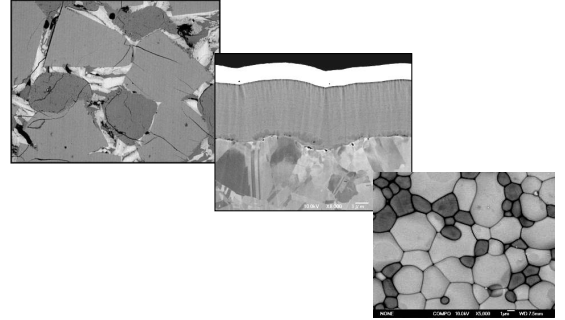


背散射电子像，黑色团状物为石墨相  
吸收电子像，白色团状物为石墨相  
铁素体基体石墨插层铁拉仲断口的背散射电子像和吸收电子像

材料科学与工程学院



## 原子序数衬度像

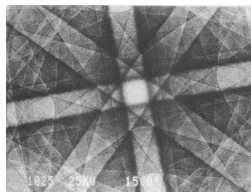


材料科学与工程学院



## 背散射电子衍射

- 背散射电子衍射可以揭示样品的晶体结构和取向



材料科学与工程学院



## 2.5 SEM的成像衬度

背散射电子像衬度的特点：

- (1) 分辨率低；
- (2) 背散射电子检测效率低，衬度小；
- (3) 主要反应原子序数衬度。



材料科学与工程学院



## 2.6 SEM试样的制备

### 2.6.1 试样

- 分为
- 导电性良好——可保持原样；
  - 不导电，或在真空中有失水、变形等现象的——需处理

SEM样品制备大致步骤：

1. 从大的样品上确定取样部位；
2. 根据需要，确定采用切割还是自由断裂得到表面；
3. 清洗；
4. 包埋打磨、刻蚀、喷金处理。

材料科学与工程学院



## 2.6 SEM试样的制备

### 2.6.2 制备试样应注意的问题

(1) 干净的固体（块状、粉末或沉积物），在真空中稳定。

(2) 应导电；对于绝缘体或导电性差的试样——则需要预先在分析表面上蒸镀一层厚度约10~20nm的导电层。真空镀膜（金粉或碳膜）



材料科学与工程学院





## 2.6 SEM试样的制备

(3) 尺寸不能过大。最大尺寸  $\leq \phi 25\text{mm}$ ，高  $\leq 20\text{mm}$

(4) 生物试样——一般要脱水、干燥、固定、染色等。

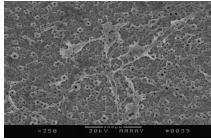
(5) 粉末试样的制备：先将导电胶或双面胶纸粘结在样品座上，再均匀地把粉末样撒在上面，用洗耳球吹去未粘住的粉末，再镀上一层导电膜，即可上电镜观察。



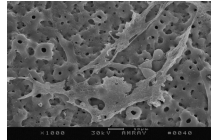


7  
9

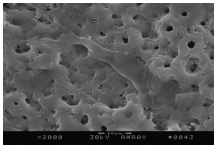
## 2.6 SEM试样的制备



(a) 350X



(b) 1000X



(c) 2000X

微弧氧化膜层表面培养的成骨细胞SEM照片

材料科学与工程学院



8  
0

## 2.6 SEM试样的制备



人类血细胞SEM照片

材料科学与工程学院



8  
1

## 2.7 小结



- SEM
- 主要利用二次电子，背散射电子
  - 构造
    - 电子光学系统 { 电子枪，电磁透镜，扫描线圈，样品室 }
    - 信号收集处理，图像显示和记录系统
    - 真空系统
  - 性能
    - 分辨率  $< 5\text{nm}$ ，新型的可达  $0.9\text{nm}$
    - 放大倍数  $M = A_c / A_s$  可达80万倍左右
  - 成像衬度
    - 二次电子像衬度—分析样品表面形貌、断口分析；
    - 背散射电子衬度—形貌分析、成分分析。
  - 制样—制备试样应注意的问题

材料科学与工程学院