

1. 红细胞：微米量级，DNA 直径：纳米量级，MEMS（微机电系统）：微米；碳纳米管，碳 60，分子：纳米量级。

定义：在原子、分子、超分子尺寸范围内的物质进行操控。
Richard Feynman：底下空间大得很。OMNI, nanotechnology, 克林顿 资金。新定义：理解控制 1-100nm 尺寸的事物。

实现：自下而上 (top-down) (分解系统) (硅片 催化 纳米吉他) 自下而上 (bottom-up) (合成) (碳纳米管) (自组装)

纳米材料：在三维空间中至少一个维度上处于纳米尺度。

维度：（一个维度在纳米尺寸）二维 Superlattice (超晶格)、Graphene (石墨烯)、MoS2、量子阱(Quantum Well)、(两个) 一维纳米管、纳米线 wire、杆 rod、(三) 零维碳 60、量子点、fullerenes (富勒烯 (包括 C60))。诺奖：石墨烯 C60

特性 (宏观)：光学 Optical 颗粒越小，发光蓝移 (波长变短)、电学、物理、化学 纳米金 红色 可弯折 $\epsilon = t(\text{thick}) / 2r \times 100\%$ 熔点低

特性不同原因：Quantum confinement 量子限制、维度、电子传输、比表面积变大 (S/V)、催化能力强。

生物检测低成本。Why 纳米：寻找新材料、发现新性质、理解自然界纳米物质。

2. 特殊性能的原因：量子限域效应 (尺寸越小，带隙增大)、维度效应、电学输运机制 (扩散输运→弹道输运、隧穿)

·用于区分不同物理体系 (纳米：介观体系) 的特征长度：费米波长 (附近：量子限域效应)，平均自由程 (微粒与其他微粒相邻两次碰撞之间所通过的距离)，相位相关长度 (失去相干性前传播的距离)

输运特性：量子限域、弹道运输、相干效应

·晶体管：真空管 (防止金属氧化、减少电子散射) → MOSFET (p-type FET + n-type FET = CMOS)

·纳米电子器件的优势：功耗低、速度快、集成度高 (功耗：弹道运输; Precisely control: reduced size ; Speed: High mobility ; Cost: Self-assembly)

3. Materials -> Processing -> Microstructure -> Properties -> Applications

(材料 -> 加工 -> 微观结构 -> 性能 -> 应用)

-机械性能：足够小，无缺陷，因而表现出理想的强度；内部受到的应力小，所以柔性 - (thermal) 热性能：可以设计成比每种散架材料的导热性更好 (或更差) 纳米管 - 中空

4. Carbon 的 2s 和 2p 轨道能级差小，二者可以相互耦合，产生很多种不同的杂化方式，而且相比 Si 和 Ge，carbon 的内层轨道比较简单，不会对外层产生太大的影响；而硅和锗的内层轨道更复杂，会对价电子产生更多影响 (只有 sp3 杂化)。

本征态：1s2 2s2 2p2 180°: 1s sp sp2 2p 乙炔 C2H2 120°: 1s sp2 sp2 sp2 2p 聚乙烯 (HC=CH-) n 石墨烯 109.5°: 1s sp3 sp3 sp3 甲烷 CH4 钻石 石墨烯 制备：石墨→膨胀石墨→薄层石墨片→石墨烯 应用：柔性显示器 (掺杂少可以实现同样的导电性，可以兼顾透光性和导电性)

·CNT (碳纳米管) 制备：碳纤维→碳纳米纤维→多壁碳纳米管→单壁碳纳米管 $C_n = n a1 + m a2$ (自然生长纯度 66.7%)

if $(2n+m)/3 = i$ (i 为整数) 金属性, else 半导体性

分类：单壁 (Single-wall, SWCNT, typical radius 1nm)、多壁 (MWCNT, typical radius > 10 nm)

特点与性质：①密度小，拉伸强度高，可弯折性好 ②电流承载能力强，做针尖场发射效果好 (针尖越细，场强越高) ③导热性好，高温下稳定 ④造价高

应用：①AFM 针尖 基因检测探针 ②开关速度很快，可以做更大的屏幕 机械存储 ③纳米镊子 (Nanotweezers) ④超灵敏传感器 ⑤储氢材料 (中空)，也可储存锂离子，制作使用寿命更长的电池 ⑥附着于扫描探针显微镜的探针上 ⑦ Superstrong Materials

例子：①碳纳米管复合材料：在材料中掺杂 CNT (透明、高弹性) 透明导体薄膜 ②CNT Yarn 碳纳米管纱：MWCNT, 耐高温、导电、高强度纤维 ③氢气存储 (SWCNT) ④CNT based transistor: SWCNT AMOLED ⑤Nanotube Computer (缺点：Bigger, slower, higher VDD 漏极电压)

·富勒烯：最对称的大分子，化学键和足球形状→incredible strength ①弱范德瓦力作用下的晶体-润滑剂 ②大表面积-催化剂 ③高温 (~500°C) 高压 ④空心的-可以作为运输的载体 (caging particles)，可能是药物输送的有用“炮弹”，能穿透细胞壁，无反应 (在血流中安全移动) ⑤化学性质稳定如石墨-五边形处最活跃(六边稳定，五边反应活性大) ⑥超导性

·炭黑 10-400 nm 应用：轮胎、黑色颜料、塑料、干电池、防紫外线等。

5. ·氧化锌纳米材料 (有极性的表面，生长的材料非常丰富) 的合成：①物理气相沉积 PVD (VLS, VS, VSS) (高温，质量好，缺陷少) (冷却水：气密性、碳：催化剂) ②化学湿法 Wet chemical method (水热分解、电沉积) (低温、低成本、缺陷多) (水解。HMTA+Zn(NO3)2·6H2O) (Seedless/seeded growth) ③脉冲激光沉积 (可控性差，产量低) ④化学气相沉积 (高成本) ⑤分子束外延 (高成本)

·碳纳米管的合成：

①Arc Discharge (电弧放电) 生产高质量碳纳米管的最古老和最好的技术之一。纳米管的生长机理尚不清楚，生长条件与合成产物缺乏很强的相关性。

②化学气相沉积 CVD 使用这种方法，当碳纳米管在高温下分解并通过过渡金属催化剂 (通常为 Fe、Co 或 Ni) 时，碳纳米管由含碳源 (通常为气态) 产生。high cost

·生长位置：顶部-衬底和催化剂之间相互作用弱 (催化剂被抬起)；底部-衬底和催化剂之间相互作用强 - 长出单壁/多壁碳管：一般由催化剂颗粒的大小来决定 优势：purer, lower temperature、可以控制碳管的生长；劣势：尽管产量变高了，但是质量变低了

③ Laser Ablation (激光烧蚀) 不太可控，产率不高；产物很丰富，可以得到一些别的材料结构

·石墨烯的合成 ①机械剥离：品质很好，但是不能大面积加工，尺寸很小 ②化学气相沉积 CVD on Ni 或 Cu。- Ni: a carbon segregation (离析) and precipitation (沉淀) process 高温下，反应气体在 Ni 表面分解，碳原子在 Ni 薄膜中溶解，随着温度降低，碳原子的溶解度降低，从 Ni 的表面析出，形成石墨烯。这个过程很难抑制多层结构的生长。- Cu: 一种表面反应过程，具有自限性质。铜具有超低碳的溶解度。即使反应物浓度高或者生长时间长，铜中只有少量的碳溶解。石墨烯形成的碳源大部分来自在铜表面的催化分解。石墨烯生长完第一层，铜表面完全覆盖，没有催化剂暴露，反应物无法进一步分解和生长。因此，铜上的石墨烯生长是一个表面反应过程，具有自限性，适合生长单层的石墨烯。

·TiO2 纳米材料的合成 ①Sol-gel (溶胶-凝胶) 钛醇盐 -> 加入酸 (催化) 发生水解

反应 -> 缩合反应 ②High Pressure Hydrothermal (高压水热) (高压提高水沸点、提高反应速度) 得到纳米线 ③Anodic Oxidation (阳极氧化) 得到纳米管

总结：①温度低：水热反应 - 在柔性衬底上生长，成本低；温度高：晶化好，但对设备要求高 (造价高)、衬底兼容性不好 ②高能过程：品质很好，但是能量释放比较快，可能性差，可以寻找新的材料。

6. 一、材料成分表征 (原子/构成成分)

1、光谱学 - 研究物质和电磁辐射之间的相互作用，其中吸收和辐射和能级信息相关 ①XPS (X 射线光电子谱)：利用光电效应，给不同能量的光子，看电子能否发射出来；只能表征表面的材料 (厚度 < 10nm)；因为内部的电子出来经历的散射比较大，不准确。②AES (俄歇电子谱)：一个电子被打出去了，留下一个空穴，外层电子跃迁下来：可能发射另一个电子 (Auger)，可能发出 X 射线。(发射电子 (俄歇)：原子序数小；发射光子 (X 射线荧光谱)：原子序数大)

2、Mass spectrometry 质谱分析：把原子变成带正电的离子，然后测量质荷比；高度可以代表丰度 (将最多的一种定为 100，称为 base peak) (准度高 设备大)

二、材料结构信息的表征 (晶体结构) 晶体 Crystal, (原子周期方式排列) amorphous 非晶体 单晶体：整个材料中原子均是一样的排列方式 多晶体：多种小区域 (晶畴) 构成 晶体的现代定义：任何能产生尖峰衍射图案的材料

- 亚原子尺度：单个原子的原子结构决定原子间的相互作用。- 原子尺度：材料中的原子排列的差异会导致不同的性质。- 微观结构：晶粒尺寸和排列确定材料的性能。- 宏观结构：材料的不同宏观特性。

1、直接成像 2、衍射成像：X 射线衍射，电子衍射，中子衍射

倒易空间：傅里叶变换反推 - 布拉格定理/劳厄方程： $2d\sin\theta = n\lambda$ (讨论：

① $2d < \lambda$ No diffraction ② $2d > \lambda$ different orders (阶) of diffractions at different angles ③ $2d > \lambda$ 衍射和反射重合 ($\theta \approx 0$)

·从衍射图样总可以得到：- Peak position 入射角的大小，和两个原子层之间的间距相关 - Peak height - Peak area 积分面积的大小，和晶体成分的比例有关 - Peak shape - Peak width 和每个单晶成分占据的大小有关系，和应力也有关 (越 sharp 晶体结构越好)

7. 显微学 (微观结构) 光学显微镜：- 瑞利判据：分辨率 $\delta = 0.61\lambda / \sin\beta = \text{波长} / \text{数值孔径}$

扫描电子显微镜 SEM：背散射/二次电子

1. 特点：放大倍数的范围很大，分辨率达到 50 埃，景深比较大，样品制备简单。2. 电压依赖关系：电子的波长： λ 正比于 $V^{-1/2}$

增加电压时：①分辨率提高，穿透力强。②材料导电能力不好的时候，表面容易出现聚集电荷；表面损伤增大，衬度 (对比度) 变差。- 因此不是电压越大越好

3. 设备 - 3.1 电子枪

- 热电子发射电子枪 - 通过加热，使电子的能量超过势垒，因此能量分布的范围比较大。

- 场发射电子枪 ①针尖更细，亮度更高，单色性也更好 (电子都分布在费米面附近) (能量展宽 Energy Spread 小)。②需要高真空 (非真空有污染物，会发生电离，会改变功函数，使发射电压不稳定；也会使环境气体分子分解；散射增强)，因此造价也更高。

- Gaseous SEM (环境 SEM) (不同气体、非真空环境) 最需要高真空的是电子枪，因此可以采用分级真空的方式。降低了成像质量，相当于做了折中。

3.2 电磁透镜：(洛伦兹力电磁偏转) 聚焦程度是连续可调的；切换光阑大小可以调节光斑；可能会出现加热的现象，因此需要冷却；图像可能出现旋转变。

非理想成像：①球差：离轴光线通过透镜会在不同的地方汇聚。②像差：(不同波长焦距不同) 与电子能量的单色性有关系；亮暗边界颜色分离的条纹。③像散：绕光轴的磁场不均匀。- 非理想效果造成的分辨率可能有很大的差异

4.1 样品制备：①样品导电：只需要用导电的胶带和胶水使样品和样品台之间形成好的导电效果，将电子导走。②样品不导电：在样品之上形成导电的薄膜 (碳、金)。否则电子会聚集形成电荷区，成像也会变形。

4.2 探测：①Backscattered electrons (背散射电子) 能量较高；可以显示成分的衬度信息；原子密度大，(穿透力弱)，背散射多，亮度大；检测背散射的时候，可以在探测圆环上加上小的反向电压 (低能电子不会被收集)。②Secondary electrons (二次电子) 来自更加表面的地方，显示形貌特征；能量低，衬度好；在侧面探测，闪烁探测器，加一个小的吸引电场 (mesh)。③EDX (energy scan for emitted X-rays) / EDS 成分特征：可以检测同一种成分在不同地方的分布情况，可以检测同一个位置的不同成分。④Auger electron spectroscopy 俄歇电子能谱 surface atomic composition 表面原子组成。⑤characteristic x-ray 特征 x 射线 thickness atomic composition ⑥cathodoluminescence 阴极发光 电子状态信息

5. 分析 - 衬度信息 (contrast) 的来源：表面形貌、成分 (元素、相位)、晶界 (晶胞的边缘、晶粒取向)、荷电情况。

- 放大倍数 $\text{Mag} = L_d / L_s (L_d \text{ 像平面}, L_s \text{ 物平面})$ 。

- 分辨率：(probe size 探针尺寸 和 步长的关系 步长太大缺信息，太小有冗余) 斑斑太大，无法分辨；相邻位点太开则一部分可能没有扫描到。

- 景深： $d = \delta / \alpha$ 。α 是所聚角，δ 是所需要的分辨率；对于表面高度差异比较大的样品比较有意义 光阑尽可能小，使得汇聚角度小

8. TEM 透射电子显微镜

信号：①transmitted electrons 透射电子 - morphological information (TEM) 形态信息 ②inelastic scattering 非弹性散射 - composition and bond states (EELS) 成分和键状态 ③incoherent elastic scattering 非相干弹性散射 ④elastic scattering 弹性散射 - structural analysis and HR imaging (diffraction) 结构分析和 HR 成像 (衍射)

特点：电压高；打点 (较大面积) 成像；可获取衍射信息；多种成像模式 (明场像、暗场像...)；波长不同会导致像差的产生，从而影响分辨率——提高电子束单色性以提高分辨率。

1. 设备：①电子枪：场发射电子枪 (加速电压更高，亮度和单色性更好) 电子源的能量要高得多。②聚焦系统 ③样品台 (始终要真空)：一般采用铜，如果孔太大就铺上碳膜。④物镜系统：成像透镜：限制成像率；光圈：控制成像条件。⑤投影透镜系统

2.1 样品制备：需要样品薄，厚度的控制非常重要。对于不同的原子序数和电子源能量，厚度会有所差别。(原子序数大的可以厚一些)

不同种类样品：- Bulk (块) Sample 减薄 - Thin Film 可以直接看，也可以转一个角度反射看 - Fiber (纤维) and powders (粉末) 制成块状再切割/排列起来切割减薄

制备操作：粉碎、切割、研磨 (机械打薄)、电化学打薄、离子研磨、涂层、复制、聚焦离子束 (FIB)

2.2 成像

- 物镜：用来形成第一幅高分辨率电子显微图像或者电子衍射花样 (投射电镜的分辨本领高低主要取决于透镜) 是强磁短焦距的透镜；放大倍数较高，一般在 100-300 倍；最高分辨率可达 0.1nm 左右。背焦面上有物镜光阑：减小球差、色差、色差；进行暗场及衍射成像)

- **中间镜**：放大或缩小来自物镜的电子像； 调节中间镜的位置，可以进行成像操作和电子衍射操作。（如果把中间镜的物平面和物镜的像平面重合，则在荧光屏上得到一幅放大像——成像操作。如果把中间镜的物平面和物镜的背焦面重合，则在荧光屏上得到一幅电子衍射花样——电子衍射操作。）弱激磁长焦距；可变倍率，可在 0~20 倍调节（其放大倍数大于 1，放大物镜像；放大倍数小于 1 时，缩小物镜像）

- **投影镜**：把中间镜放大或缩小的像（电子衍射花样）进一步放大并投影到荧光屏。(1) 强激磁短焦距；(2) 孔径角很小，因此景深和焦距都非常大。

- **物镜光阑**（衬度光阑）——物镜的后焦面上。(1)减小物镜孔径角，以减小像差，获得衬度较大的、质量较高的显微图像。(2)在物镜的后焦面上套取衍射束的斑点（副焦点）成像，获得暗场像。

- SAD aperture **选区光阑**（场限光阑或视场光阑）——物镜的像平面上。用于选区衍射，也就是选择样品上的一个微小的区域进行晶体结构分析，限制电子束只能通过光阑孔限定的微区成像。微区的尺寸不能太小。

衍射模式： $\lambda = 2d \sin \theta$ diffraction angle θ : 0~1.5 然后选区

3.1 **成像类型**：①**吸收像**（质厚衬度/散射衬度）：样品质量、密度较大时，主要成像作用是散射。非晶体样品的主要衬度来源，都是非相干光。②**衍射像**（衍射衬度）：由于晶体的取向不同，导致各个晶粒对电子的衍射能力不同所产生的衬度变化。晶体样品的主要衬度来源，非晶体没有。当完整晶体存在一定程度不均匀性，例如厚度或取向的微小变化，这时衍射像上呈现一组明暗相间的条带，称为等厚或等倾消光轮廓；若无厚度或取向变化，则为均匀的衬度；对晶体结构和取向非常敏感，对研究晶体内部的缺陷非常有用。（- 明场：只有中央亮纹被使用了 - 暗场：使用了其他的衍射条纹（一般来看晶体取向））③**相位像**（相位衬度/高分辨像）：样品很薄，几乎不改变透过电子波的振幅（位相物体），依然可以保留相位信息。由投射束和一束以上的衍射束多光束干涉形成，可以获得原子像、结构像、点阵像、高分辨像。包含了两次傅立叶变换：物面波在物镜后焦面上得到衍射谱；各级衍射波相互干涉，在像平面处得到晶格条纹像。

3.2 **成像结果** ①EDS：X 射线能量分析谱（获得成分信息，元素表征） ②EELS：电子能量损失谱（成分分析）（化学态表征）

9. **扫描探针显微镜 SPM** - 扫描隧道显微镜 STM 和[扫描力显微镜（SFM）举例：原子力显微镜 AFM]

STM 是第一台产生具有原子分辨率的表面真实空间图像的仪器。矢量模式（来回均可扫描）。样品要能导电（导体（金属）或者半导体）。灵敏度极高（0.01nm）。1. **基本组成**：①金属针尖：应该要能导电，但形状不用讲究，任何一个金属针尖都一定有一个最前端原子（距离最近的两个原子之间才有隧穿电流）。选用的针尖功函数越大越好（Pt 非常软，所以在钨丝表面蒸镀一层高功用的金属）②压电扫描器：利用压电原理达到精确的位置控制 ③电流放大器 ④双电位偏压 ⑤反馈系统

2. **原理** 产生隧道电流的条件：①距离很小：电子的波函数要相互重叠 ②两侧要有偏压。隧道电流随间隙 d 的增加呈指数衰减。 $I(d)=\text{constant} \times eV \exp(-2d \cdot \sqrt{\Phi})$ （功函数： Φ ，偏置电压：V）

两种**工作模式**：①恒定高度（光栅扫描）：检测隧道电流；速度比较快，但只能反应相对平整的表面；可以反应快速变化的表面过程②恒定电流：检测高度；需要反馈系统，速度较慢，但是效果更好。

Tips：- 仅当表面只有一种原子的时候，才能反应形貌；实际上反应的是局域态密度(Density of States (DOS)) - 加工等因素都会影响功函数（乐观主义者：可以检测电学性质）；- 需要高真空（UHV 超高真空）；- 影响分辨率的因素之一是波纹，表面原子的电子密度在离表面的高度上有多大的变化。石墨有很大的波纹，非常平面，因此是最容易用原子分辨率成像的材料之一。

10. **AFM 原子力显微镜**

1. **结构**：利用了震动悬臂梁加上光杠杆，利用了**激光**（很高的密度->很小的束斑->很好的空间分辨率）和光电二极管（在二维方向上有很好的分辨率）

2. **特征** ①扫描方式：光栅模式（只能向一个方向扫描） ②2D 扫描的分辨率：由步长、扫描线条的数量、针尖的锐利程度（Key Point）来决定。③AFM 与电子显微镜的对比：1. 扫描电子显微镜 x-y 方向更准确。2. 显微镜仅可以获得衬度信息，但是 AFM 可以获得 z 方向高度的具体数值，垂直方向更准确。

3. **原理**：相互作用力主要是**电磁相互作用**：机械接触力、**范德华力**、毛细力、化学键、静电力、磁力等。样品表面的起伏引起探针与材料表面原子之间的电磁相互作用力的大小变化，从而影响探针的高度或振幅，检测这种变化即可实现对表面形貌的表征。

工作模式（Contact mode）--恒定高度模式：在范围比较小的区域里，可以快速变化。--恒定力：精度高、速度慢（使用更加广泛）。

工作模式：1、**Non-contact Mode** 吸引力：原子间的瞬时极化；针尖工作在共振频率下，振幅是确定的；力非常小（测量难度比较大）；适合研究软或者有弹性的材料，不会对材料造成污染。2、**Contact（接触）Mode** 排斥力：电子轨道相互重叠导致的交换相互作用；针尖应该比较软；但是太软了就扫不动了，无法反映地形；可能有机械损伤/污染。Contact Mode 的其他用途：用于微纳加工。可以去除表面的大分子(Nanoshaving)；也可以进行表面移植(Nanografting)。

12 接触式与非接触式的**比较**--非接触：毛细力和范德华力在同一个量级上。所以在表面有水滴的时候 Contact Mode 更加精确（排斥力>>毛细作用力），几乎不会产生影晌。

3、**Tapping Mode** 介于接触式和非接触式之间的一种方式，与非接触式更加接近。测量振幅。轻敲式与非接触式的比较：①都有一个力学反馈系统，使振幅固定在一个高度上。②但是非接触式是全振幅，Tapping 是 50%-60%的振幅。

③Tapping 可以提供很高的分辨率和很小的材料损伤

三者破坏程度的比较：①Contact Mode 会受表面相互作用的影响，会对表面造成损伤。②Non-contact Mode 分辨率比较低，会受表面的水滴等污染物的影响。

③Tapping 结合了上面两者的优点，既能限制摩擦力，又能免受污染物的影响。

Phase Image **相位成像** 一种 tapping 模式的二次成像技术：测量相位延迟（针尖抬起相对于悬臂梁抬起的延时）。用于绘制弹性、附着力和摩擦等表面特性的变化（这些都可能导导致相位滞后）。在所有力的显微镜中都可以用（当仪器在任何振动悬臂梁模式下工作时，如 tapping 模式 AFM、MFM（磁）、EFM（静电），都可以产生相位检测图像。）在拍摄地形图像时监测相位滞后，以便同时采集几何和材料特性的图像。

应用：- 污染物的标定- 测量样品表面不同的材料- 区别样品表面黏附程度不同的区域- 可以应用于存储和半导体工业- 可以应用于 Tapping Mode AFM，用于生物体样品（软、有粘附力、易损坏、连接稀疏）的表征成像

4. **探针**：Fat-tip Effect 由于探针的尺寸太大，可能造成失真；也会降低分辨率（Rtip 太大，W>真实的 sample 宽度，横向会有展宽） $W=4 \cdot (R_{\text{tip}} \cdot R_{\text{sample}})^{1/2}$ 。所以探针要做的很细：进行减薄；coating 上强度很高的材料。X-y 方向用扫描电子显微镜，z 方向用 AFM。共振频率大于 100Hz，排除环境机械振动干扰。

1.1. **操控和加工**：对操作加工对象的位置、方位、尺寸、形状、原子结构、化学成分等等的控制。**原位**：利用电子显微镜对纳米材料进行观测的同时，对其进行操纵和加工。原位操纵加工是原位测量的前提和基础（力学特征测量需要操纵材料）。

1.1 **扫描电镜**：- 样品制备容易，对样品尺寸和厚度要求不高- 分辨率不高，主要得到样品表面信息，很难得到样品体内结构信息- 样品室空间大，易于在样品室装配纳米机械手

1.2 **透射电镜**：- 样品制备复杂，样品必须足够薄（~100nm）- 分辨率高，具有原子分辨，能得到晶体/原子结构信息- 样品杆空间狭小（直径小于 3mm），不易引入纳米机械手进行原位操控和加工

2. 电镜（眼睛）和纳米探针（手）的结合将眼睛和手同时延伸到纳米尺度，从而可以对纳米材料进行实时地操纵和加工。

3. **纳米操纵** 3.1 **特点** ① 范德华力、静电力、弹性力占主导，重力可以忽略 ② 衬底和材料的力不可以忽略

3.2 **无定形碳**的沉积：纳米焊接“胶”。电子束辐照导致无定形碳的淀积（真空中也有有机大分子：密封用的油脂）。一种方便有效的固定纳米结构的方法

3.3 纳米材料的**搬运**：①先淀积，再将电极压到需要的地方；然后将没有用的纳米线去掉。②将特定的 CNT 搬运放置到基底表面的电极上

3.4 小直径 CNT 的操纵：在 SEM 中完成电学量等的表征，转移到 TEM 中表征结构，要求全程无污染和损坏

4. 纳米结构的**加工**。目的：对纳米结构进行加工，得到特定形状、尺寸、尖端结构、晶体结构、化学成分的纳米结构。

手段：电子束致无定形碳沉积（EBID）、电场、电流/焦耳热、电子束等。

电流/焦耳热（多壁碳管的削尖。悬空中间温度最高，先断。可以实现互联角度、分支长度可控，复杂的 CNT 互联结构。晶体结构的加工：非晶纳米线变成晶体纳米线。“**纳米刀**”技术：机制：焦耳热导致 CNT 的局部热蒸发；“纳米刀”：粘在金属针尖上的 CNT，需要满足：L_knife<<L_CNT）基于电流操纵：传输。 电场加工：场电子发射、场离子蒸发。低能电子束腐蚀切断多壁碳纳米管（化学腐蚀）。电子束辐照掺杂：缺点：只能碳元素，优点：室温、精度很高、指哪打哪

借助纳米探针、EBID、电流/焦耳热、电场、电子束实现了对单根纳米材料的位置、形状、尺寸、结构、成分等等的原位操控和加工。