

---

# 材料物理专业实验

于金库

---

# 实验一、真空蒸发法制备碳膜

# 实验目的

---

- 1、了解相关真空设备的工作原理和工作方式；
- 2、了解真空蒸发镀膜设备的结构和工作原理；
- 3、了解真空蒸发镀膜的实验过程和特点。

# 实验原理及方法

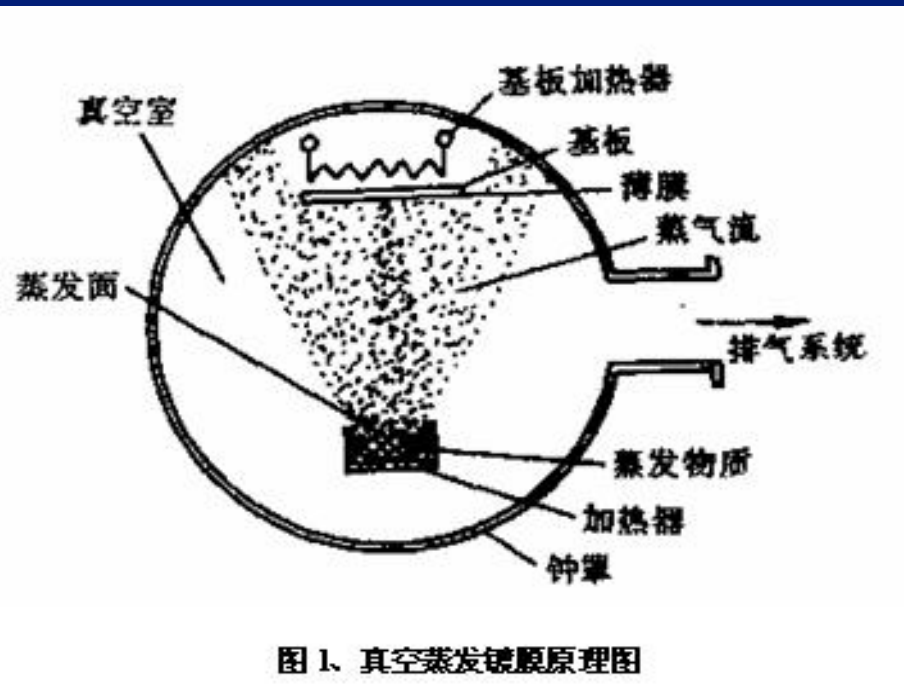
真空蒸发镀膜法(简称真空蒸镀)是在真空室中，加热蒸发容器中待形成薄膜的原材料，使其原子或分子从表面气化逸出，形成蒸气流，入射到固体(称为衬底或基片)表面，凝结形成固态薄膜的方法。由于真空蒸发法成真空蒸镀法主要物理过程是通过加热蒸发材料而产生，所以又称热蒸发法。采用这种方法制造薄膜，用途十分广泛。近年来，该法的改进主要是在蒸发源上。为了抑制或避免薄膜原材料与蒸发加热器发生化学反应，改用耐热陶瓷坩锅。为了蒸发低蒸气压物质，采用电子束加热源或激光加热源。为了制造成分复杂或多层复合薄膜，发展了多源共蒸发或顺序蒸发法。为了制备化合物薄膜或抑制薄膜成分对原材料的偏离，出现了反应蒸发法等。

一般说来，真空蒸发(除电子束蒸发外)与化学气相沉积、溅射镀膜等成膜方法相比较，有如下特点：设备比较简单、操作容易；制成的薄膜纯度高、质量好，厚度可较准确控制，成膜速率快、效率高，用掩模可以获得清晰图形；薄膜的生长机理比较单纯。这种方法的主要缺点是，不容易获得结晶结构的薄膜，所形成薄膜在基板上的附着力较小，工艺重复性不够好等。

下图为真空蒸发镀膜原理示意图。主要部分有：(1)真空室。为蒸发过程提供必要的真空环境；(2)蒸发源或蒸发加热器。放置蒸发材料并对其进行加热；(3)基板，用于接收蒸发物质并在其表面形成固态蒸发薄膜；(4)基板加热器及测温器等。

真空蒸发镀膜包括以下三个基本过程：(1)加热蒸发过程。包括由凝聚相转变为气相(固相或液相—气相)的相变过程。每种蒸发物质在不同温度时有不相同的饱和蒸气压；蒸发化合物时，其组分之间发生反应，其中有些组分以气态或蒸气进入蒸发空间。(2)气化原子或分子在蒸发源与基片之间的输运，即这些粒子在环境气氛中的飞行过程。飞行过程中与真空室内残余气体分子发生碰撞的次数，取决于蒸发原子的平均自由程，以及从蒸发源到基片之间的距离，常称源—基距。(3)蒸发原子或分子在基片表面上的淀积过程，即是蒸气凝聚、成核、核生长、形成连续薄膜。由于基板温度远低于蒸发源温度。因此，沉积物分子在基板表面将直接发生从气相到固相的相转变过程。

上述过程都必须在空气非常稀薄的真空环境中进行。否则，蒸发物原子或分子将与大量空气分子碰撞，使膜层受到严重污染，甚至形成氧化物；或者蒸发源被加热氧化烧毁；或者由于空气分子的碰撞阻挡，难以形成均匀连续的薄膜。由于真空蒸发镀膜必须在高真空状态下进行工作，这就要求相应的真空设备必须具备抽取高真空的能力。根据课堂所学内容，高真空的获得需要初级泵和次级泵同时工作才能够达到，本设备采用机械泵和扩散泵作为真空设备获得真空。



## 实验仪器及材料

- 1.真空镀膜机1台（罩内装有一对碳棒）。
- 2.透射电子显微镜1台。
- 3.金相试纸，AC纸，胶带，载玻片，铜网，剪刀，镊子，丙酮，磨口杯，蒸发皿，滤纸，蒸馏水。

# 实验步骤

- 1、在经过侵蚀的金属样品尚滴一滴丙酮（注意不要太多），然后贴上一片稍大于样品预先准备好的AC纸，注意不要留有气泡和褶皱（从试样的一边开始粘贴）。静置片刻以使之干燥。揭开并扔掉AC纸，去掉试样表面的灰尘和锈斑，然后再贴一次AC纸膜。
- 2、用镊子小心地揭开已经干燥的AC纸，剪去两边多余部分后平整地贴在载波片上。
- 3、将载波片放入真空镀膜机中，以 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 角倾斜喷碳镀膜。

镀膜过程和实验步骤如下：

- (1)打开总电源。打开操作面板上的控制开关；
- (2)打开冷却水，开机械泵抽5—6min后，给扩散泵加热，待加热30min后，停机械泵
- (3)将低真空三通阀拉出。开磁力充气阀对钟罩充气，取下钟罩，关磁力充气阀。
- (4)在蒸发电极I的钨丝网内放入金丝或铬粒。在蒸发电极处安放磁棒，摆好样品，调整好蒸发距离与角度。盖上钟罩。
- (5)开机械泵，开低真空测量，对镀膜室抽低真空达 $8\text{—}5\text{Pa}$ 左右。
- (6)将低真空三通阀手柄推入抽系统，开高真空蝶阀，待真空度达 $1\times 10^{-1}\text{Pa}$ 时，开高真空测量；

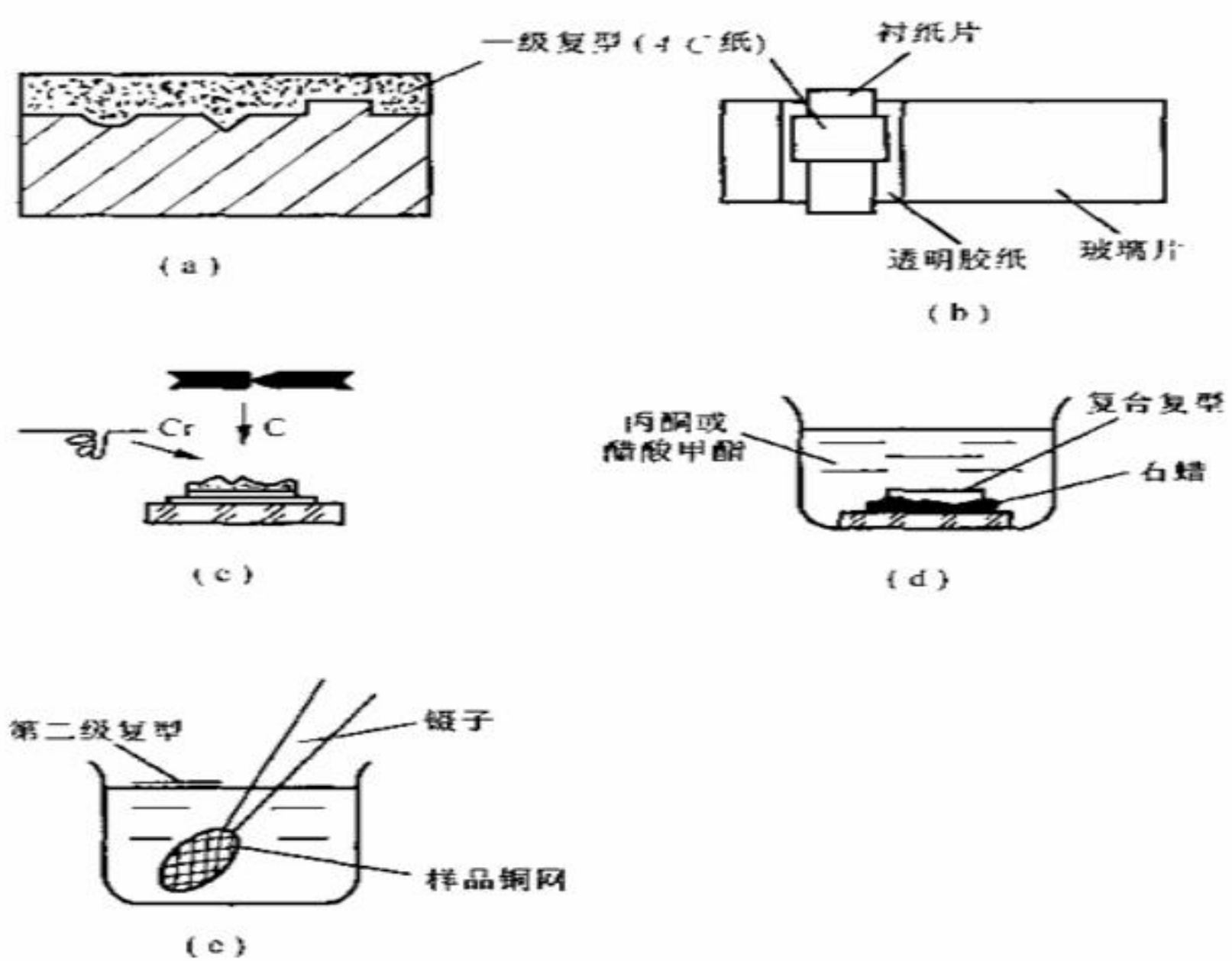


图 2、二级复型制备过程示意图



(7)当真空度达到 $3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时，将开关3HK拔到蒸发档，蒸发极拨到I，转动调压手轮，逐渐加大电流，重金属发出辉光，随后开始熬发，待蒸发完毕，把旋转调压器手轮归零。

(8)把蒸发电极拨到II位置，再转动调压手轮，逐渐加大电流至出现辉光放电，碳开始蒸发，当乳白色瓷片未滴油处出现棕色时，喷碳完毕，旋转调压器手轮归零。

(9)待样品冷却后，关闭高真空测量和高真空蝶阀，把低真空三通阀手柄拉出，关机械泵，开磁力充气阀充气，关充气阀，取下钟罩，取出样品，清洗镀膜室，盖上钟罩。开机械泵抽低真空5—6min后停机械泵，关闭各电源及总电源。待扩散泵停止加热30min后再关冷却水，全部工作结束。

4、从真空镀膜机取出载玻片，把碳膜剪成小于铜网大小的方块，并放入装有丙酮的磨口杯，此时AC纸徐徐溶解掉，碳膜将浮出液面。

5、用铜网把漂浮的碳膜捞起来放进蒸馏水中清洗，再用镊子夹住铜网把蒸馏水中的碳膜捞起来放在滤纸上，干燥后放入样品盒中待观察。

# 实验报告要求

---

简述物理气相沉积法制备碳膜的工作原理、特点和主要过程，撰写实验报告。

## 思考题

- 1.在实验过程中，如果使用的不是石墨电极而是金属铝或者镍，那么会得到什么样的结果？为什么？
- 2.采用真空蒸镀法制备碳膜或其它薄膜材料，有哪些用途？

---

## 实验二、X射线掠入射角分析薄膜结构

# 实验目的

---

- 1.学习并了解X射线衍射的工作原理；
- 2.采用掠入射角X射线衍射观测薄膜材料的结构特征的基本原理和方法；
- 3.掌握衍射图谱的基本标定方法。

# 实验仪器

---

本实验所用仪器为Rigaku D/max-2500/PC型X射线衍射仪。  
实验所用样品为采用磁控溅射镀膜法制备的标准薄膜样品。

# 基本原理

用X射线掠入射来研究物体表面内结构，其基本原理与一般的三维X射线衍射相同，数据处理也与三维情况类似、只不过是加上了表面敏感这一点。

从理论推导可以得到由于X射线在物体中的折射率较小，通过掠入射的方法。可使X射线在物体小的透入深度大大减小，从而成为研究物体表面结构的方法。在入射角和出射角接近X射线反射时的临界角时，可以得到最强的表面信号。对于物体表面内二维结构的分析与一般情况下三维物体X射线衍射结构分析相同。较浅的X射线透入深度，使得布拉格点在垂直表面方向上展宽而成为棒形。通过掠入射，我们可以得到物体在表面内二维结构的主要特征。

X射线掠入射比较复杂，需要有专门的实验装置。对于X射线源的要求。不仅要强度高，准直性好，而且还要是点光源，并能调节掠射角。对于衍射仪，样品台和探测器除了一般的旋转外，还需要能调节高度。狭缝系统要有水平印垂直二方向的狭缝。一个典型的X射线掠入射装置如图1所示，X射线从点光源出发，经过索拉狭缝后入射到单色晶体上，经过单色晶体的X射线变成单色、线状的光源，在垂直方向具有一定的发散性。这束X射线经过水平和垂直方向双重狭缝之后，入射到样品上。此时的x射线水平方向的分散度得到进一步限制。垂直方向的分散度和掠入射角也得到控制。经样品衍射后的X射线经过水平和垂直狭缝之后到达探测器。具有一定出射角和水平方向衍射角的x射线被探测到。这样。物体表面内的结构就可以被各种转动样品和探测器的扫描方法得到的衍射谱反映出来。



# 实验步骤

在进行x射线掠入射之前，必须对仪器进行调光。在水平方向调光。在包括单色晶体，各水平狭缝和衍射仪中心位置的调节，与一般衍射仪的调光方法相同，这儿不再叙述。在垂直方向的调光，必须先使衍射仪的转轴保持垂直、然后找出使x光线垂直于衍射仪转轴的垂直方向的狭缝的高度。具体步骤如下：

1. 调整样品台的倾斜。使样品台在旋转时，面上各处的高度不变。此时样品台垂直于衍射仪的转轴。
2. 调整整个衍射仪的倾斜度。使样品台水平。此时衍射仪的转轴已处于垂直方向。
3. 在样品台边上设置垂直方向狭缝。打开样品台的垂直方向狭缝。调节探测器前狭缝的高度。使x射线通过这2个狭缝的强度最大。
4. 在样品台上狭缝靠近探测器和靠近单色器二端重复步骤3。观察探测器前狭缝的高度差。
5. 改变样品台上狭缝的高度。重复步骤4。使二次探测器的高度相同。
6. 去掉样品台上狭缝。并调节样品台前面狭缝垂直方向的高度。使信号达到最强。此时两个垂直方向狭缝的位置为初始值。

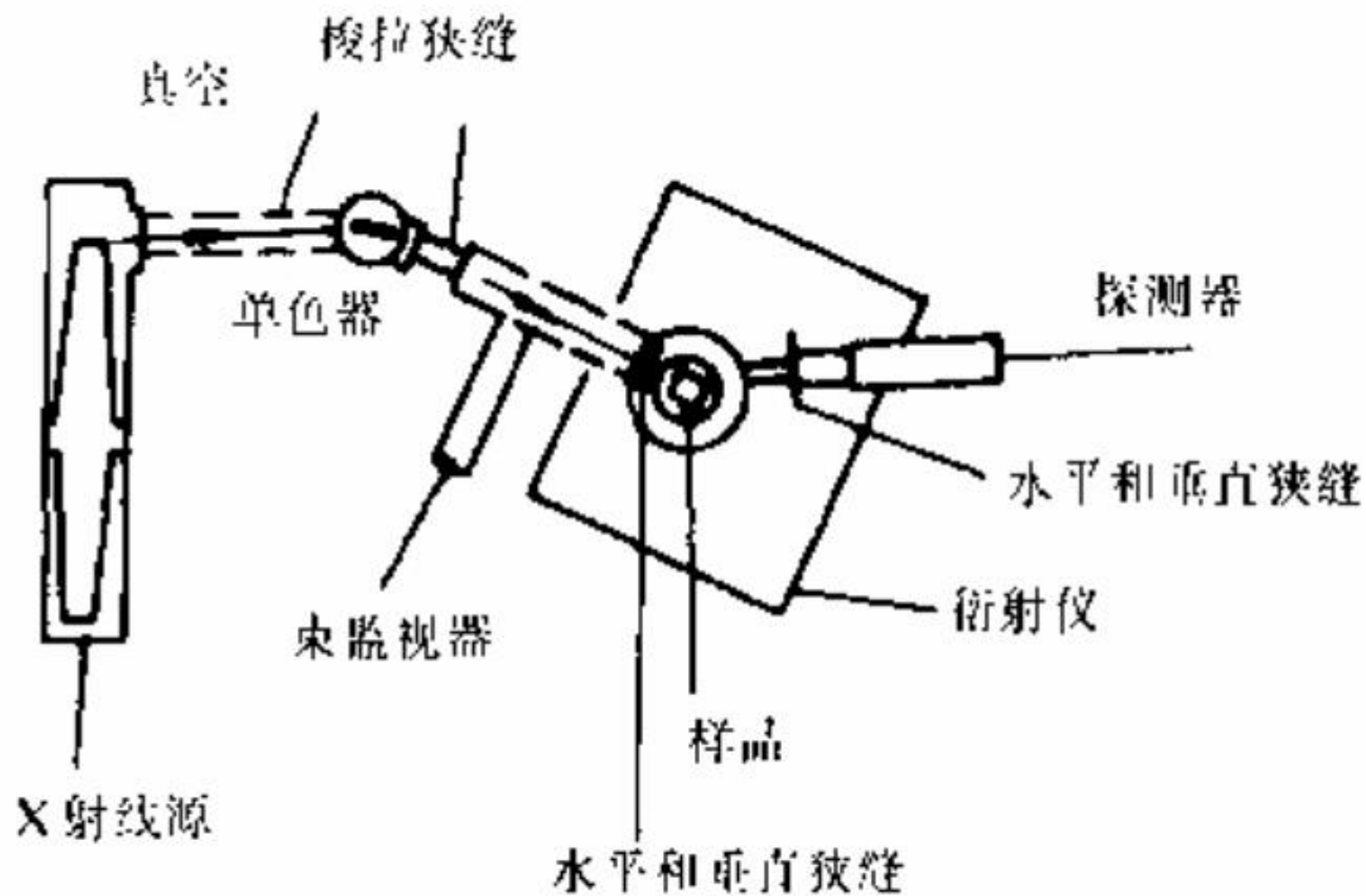


图 1、X 射线掠入射的实验装置图



仪器调好之后。就可以安装上样品做掠入射实验了。样品的零点高度和倾角的调整可以通过下述方向调整。

- 1.从下往上引高样品。使x射线的计数强度为原来的一半。然后调节样品在平行x光线方向的倾角。使计数强度达到极大。

- 2.重复步骤1。直至调节样品倾角不能使计数强度增大。反而减小。

- 3.将样品旋转 $90^\circ$ ，重复上面2个步骤。调节这一方向的倾角。

上述步骤可多次调节。直到满意为止。到此调光步骤已经完毕。可以进行掠入射测量了。可以按照如下步骤进行掠入射的测量。

- 1.根据预定的掠入射和出射角的大小。计算并调节垂直方向狭缝的高度和样品的高度。并根据X射线强度分辨率的综合考虑确定狭缝宽度。

- 2.根据预计的布拉格峰的位置。设置探测器的位置。然后旋转样品。找出峰值位置。

- 3.仔细调节布拉格峰的位置。并由此确定样品的表面取向。

- 4.进行所需的各种x射线衍射实验。如横向扫描，纵向扫描。或者倒格矢空间的HK扫描。测定其表面结构。

## 实验注意事项

---

X射线掠入射实验，是一种比较专门的测量方法。无论对于实验设备。还是实验方法。都有很高的要求。在实验设备方面。除了高强度的x光源外。还需要大尺寸的X射线衍射仪。并且有垂直方法可调的狭缝。样品台必须具备三维平移的可调性和二维倾角的可调性。由于X射线源强度很大。这种调节最好是在计算机控制下自动调节。在实验方法方面。仪器和样品的调节至关重要。关系着实验的成败。从上而下的实验步骤中可以看到。仪器和样品的调节占了一大部分。而最后的测量只占一小部分，可以看出它的分量。

如果X射线源的垂直方向的倾角很难调正，如大部分同步辐射X射线光源，也可以用倾斜整个衍射仪的方法实现入射角的调节。也可以用倾斜单色晶体的办法实现。此时整个衍射仪必须具有横向平移的功能。因为x射线在改变垂直方向倾角的同时。也改变了水平方向的偏转角度。

X射线单色器。也可以改用相互平行并且相衬的两块单色晶体组成。这种单色器的优点是入射的X射线和出射的X射线方向一致。很适合在使用同步辐射光源的装置上的应用。

掠入射时的入射角和出射角的选择非常重要。关系着掠入射的信号强度的大小和X射线在物体中的透入深度。对于研究表面上较薄层处的结构，当入射角和出射角接近于临界角时，测得的掠入射信号强度最大。在进行这一类实验时，要选取接近x射线在该物体上发生全反射的临界角的角度。作为入射角和出射角。在测量物体在不同深度处的结构。可以通过改变入射角和出射角的办法，改变X射线的透入深度，测量一系列在不同深度时的结构数据。然后通过分析得到结构随深度的变化关系。

在分析物体的表面结构时。要用散射矢量的水平分量。而不是整体数值。来计算物体表面结构。由边界条件可知。X射线散射矢量的水平分量是固定的。等同于散射矢量在空气中的数值，因此没有因折射而引起的修正。

对于X射线反射率的测量，也可以采用本实验装置，此时。把探测器放在 $2\theta=0^\circ$ 的位置，入射角和出射角的调节通过改变各垂直方向狭缝和样品台的高度来实现。这对于测定液体表面的反射率是非常必要，因为液体的表面总是水平的。

# 实验报告要求

---

- 1.描述掠入射角观测薄膜样品结构的基本原理和方法；
- 2.根据X射线衍射结果确定样品的物相、晶系及晶面指数。

---

# 实验三 非晶合金热处理后的晶化过程

# 实验目的

---

1. 学习非晶合金晶化所需要的热处理工艺和过程。
2. 了解非晶合金的热力学亚稳特性以及固体相变的主要特征。
3. 学会使用X射线衍射方法对非晶合金的相变过程进行分析和验证。

# 实验原理及方法

非晶态金属合金是将合金组成从气态或液态快速凝固，以致将原子的液体组态冻结下来。由于这一过程具有明显的动力学特征，所以从热力学角度进行分析就可以发现，非晶材料具有明显的热力学的不稳定性。在较高的温度条件下，非晶合金会进行结构弛豫，并导致结晶化。

非晶合金晶化时伴随着1%的致密化，焓降低约相当于熔化潜热的一半，同时多数物理性能有显著变化。非晶合金的精华类似于熔体在刚低于熔点时的成核和长大过程，因而提供了一个独特的机会来研究在可控条件下晶体长大呈各向同性的中间物，以及检验经典成核和长大理论在大的过冷条件下应用的可能性。与此同时，非晶合金的局部或者全部晶化，可以用来产生新的有用的微结构，比如纳米结构材料。

非晶合金的晶化过程由于需要较高的热处理温度，所以通常在真空或者保护气氛下进行。与此同时，热处理温度和时间是控制非晶晶化的最主要的工艺参数。热处理温度的提高会加快晶化速率，促进晶核的形成和长大。热处理时间的增加也有利于非晶的结构弛豫和晶体的长大。

# 实验仪器及材料

---

- 1.制备试验：真空退火炉；
- 2.附属设备：真空机组以及真空测量设备；
- 3.试样：通过急冷法制备得到的ZrTiCuNiBe非晶合金；
- 4.X射线衍射仪对退火前后的合金样品进行结构测试。



# 实验步骤

---

1. 将已经制备好的ZrTiCuNiBe非晶合金放入真空退火炉中；
2. 用真空机组对退火炉的真空室抽真空至真空室压力达到 $1 \times 10^{-3}$ 帕；
3. 将真空退火炉进行通电，并使其温度保持在560C上，保温时间为90min；
4. 待样品冷却后取出，进行X射线衍射分析，并对X射线衍射谱进行分析和标定。

# 分析整理实验数据，写出实验报告

---

## 思考题

1. 在非晶晶化的热处理工艺参数中，退火温度应该如何确定？
2. 分析退火前后合金样品的结构差别。

# 实验四 纳米压痕实验

# 实验目的

---

- 1.学习、了解纳米压痕仪结构、原理以及操作方法。
- 2.学习根据压痕实验结果，对样品进行微观力学性能分析的方法。

# 实验设备

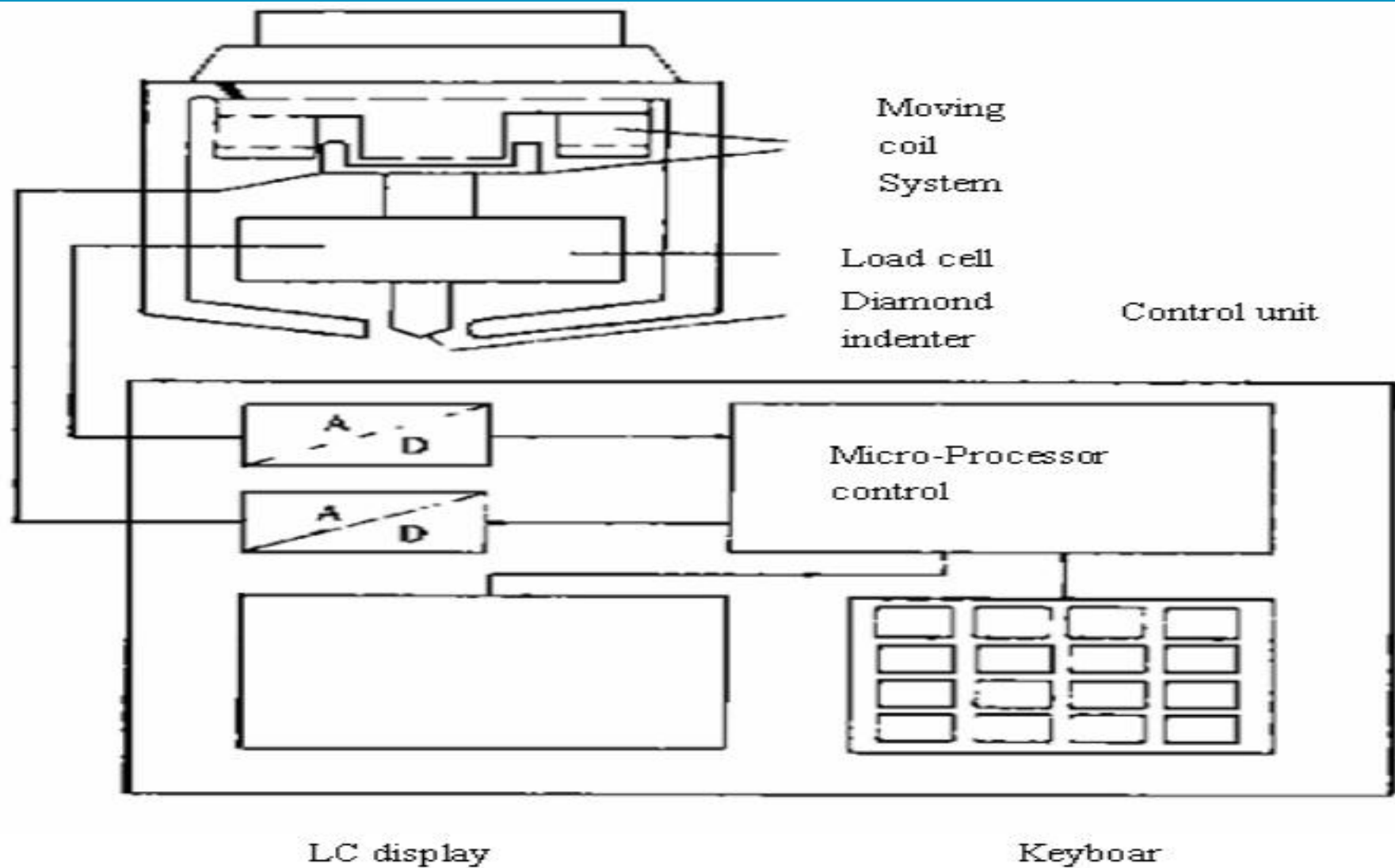
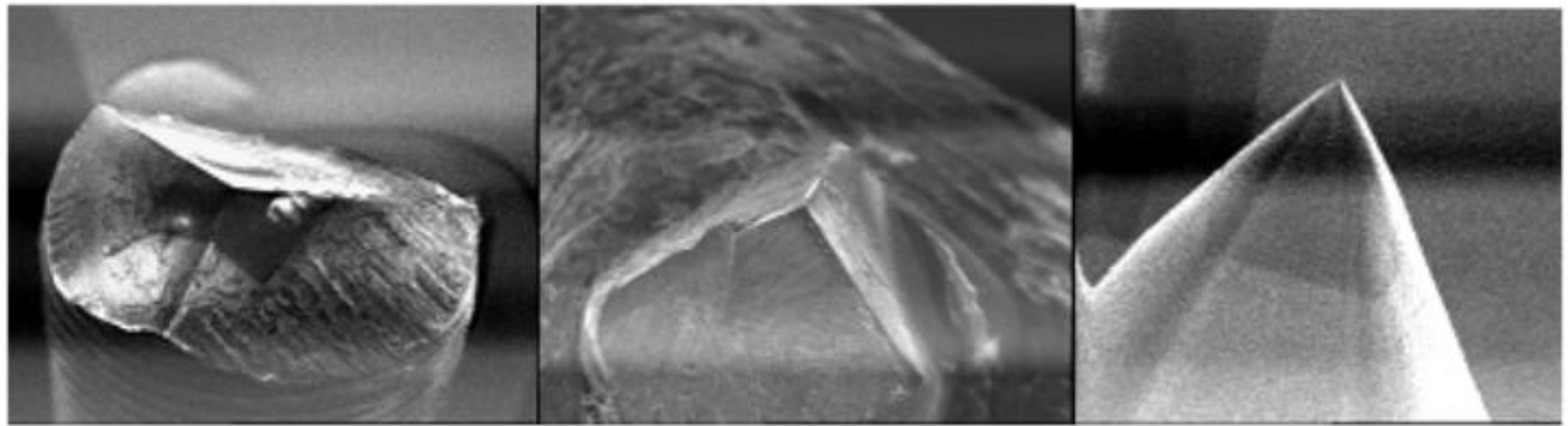


图1 纳米硬度计工作原理示意

原位纳米力学测试系统(nanoindentation, instrumented-indentation testing, depth-sensing indentation, continuous-recording indentation, ultra low load indentation)是一类先进的材料表面力学性能测试仪器。该类仪器装有高分辨率的致动器和传感器，可以控制和监测压头在材料中的压入和退出，能提供高分辨率连续载荷和位移的测量。包括压痕硬度和划痕硬度两种工作模式，主要应用于测试各种薄膜（包括厚度小于100纳米的超薄膜、多层复合膜、抗磨损膜、润滑膜、高分子聚合物膜、生物膜等）、多相复合材料的基体本构和界面、金属阵列复合材料、类金刚石碳涂层（DLC）、半导体材料、MEMS、生物医学样品（包括骨、牙齿、血管等）和生物材料、等在nano水平上的力学特性，还可以进行纳米机械加工。通过探针压痕或划痕来获得材料微区的硬度、弹性模量、摩擦系数、磨损率、断裂刚度、失效、蠕变、应力释放、分层、粘附力（结合力）、存储模量、损失模量等力学数据。

图1为纳米硬度计的工作原理图。纳米硬度计主要由移动线圈、加载单元、金刚石压头和控制单元4部分组成。压头及其所在轴的运动由移动线圈控制，改变线圈电流的大小即可实现压头的轴向位移，带动压头垂直压向试件表面，在试件表面产生压力。移动线圈设计的关键在于既要满足较大量程的需要，还必须有很高的分辨率，以实现纳米级的位移和精确测量。压头载荷的测量和控制是通过应变仪来实现的。应变仪发出的信号再反馈到移动线圈上，如此可进行闭环控制，以实现限定载荷和压深痕实验。整个压入过程完全由微机自动控制进行。可在线测量位移与相应的载荷，并建立两者之间的关系。压头大多为金刚石压头，常用的压头有Berkovich压头、Cube Corner压头和Conical压头。



(a) Berkovich压头 (b) Cube-corner压头 (c) Conical压头

图2 三种典型压头形状

**Berkovich**压头 是纳米压痕硬度计中最常用的。它可以加工得很尖，而且几何形状在很小尺度内保持自相似，适合于小尺度的压痕实验。目前，该类压头的加工水平：~~端部半径 50nm，典型值约40nm，中心线和面的夹角精度为 $J=0.025^\circ$ 。~~在纳米压痕硬度测量中，**Berkovich**压头是一种理想的压头。优点包括：易获得好的加工质量，很小载荷就能产生塑性，能减小摩擦的影响。

**Cube-corner**压头 因其三个面相互垂直，像立方体的一个角，故取此名称。压头越尖，就会在接触区内产生理想的应力和应变。目前，该种压头主要用于断裂韧性 (fracture toughness) 的研究。它能在脆性材料的压痕周围产生很小的规则裂纹，这样的裂纹能在相当小的范围内用来估计断裂韧性。

锥形压头 圆锥具有尖的自相似几何形状，从模型角度常利用它的轴对称特性，纳米压痕硬度的许多模型均基于圆锥压痕。由于难以加工出尖的圆锥金刚石压头，它在小尺度实验中很少使用。



# 实验原理

纳米压痕能完成多种力学性能的测试，最直接测量的是硬度(H)和弹性模量(E)；对不会导致压痕周围凸起(pile-up)的材料，如大多数陶瓷、硬金属和加工硬化的软金属，硬度和弹性模量的测量精度通常优于10%。

在加载过程中，试样首先发生弹性变形，随着载荷的增加，试样开始发生塑性变形，加载曲线呈非线性；卸载曲线反映了被测物体的弹性恢复过程。通过分析加卸载曲线可以得到材料的硬度和弹性模量等。图3(a)给出了典型的整个加载和卸载过程中的压痕载荷(load or load on sample) $P$ 与位移(displacement or displacement into surface) $h$ 之间关系的曲线。图3(b)为一轴对称压头(tip)在加卸载过程中任一压痕剖面的示意图。在压头压入材料的过程中，材料经历了弹性和塑性变形，产生了同压头形状相一致的压痕接触深度(contact depth) $h_c$ 和接触圆半径(radius of the circle of contact) $a$ 。在压头退出过程中，仅弹性位移恢复。硬度和弹性模量可从最大压力 $P_{max}$ ，最大压入深度 $h_{max}$ ，卸载后的残余深度 $h_f$ 和卸载曲线的端部斜率 $S=dP/dh$ (称为弹性接触刚度elastic contact stiffness)中获得。

假设：试样为各向同性材料，其几何尺寸远大于压痕的尺寸；材料表面平整；不存在与时间相关的变形，即无蠕变和黏弹性。定义硬度 $H$  (hardness) 和复合响应模量 $E_r$  (composite response modulus)

$$H = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

式中 $P$ 为在任意压痕深度的实时载荷， $A$ 为在 $P$ 作用下接触表面的投影面积。根据此定义，纳米压痕硬度是材料对接触载荷承受能力的量度。这里，请注意该定义与传统显微硬度定义( $H = P_{\max} / A_{\text{residual}}$ )的区别。对于塑性形变起主要作用的过程，两种定义给出类似的结果；但是，对于弹性形变为主的接触过程，两种定义将给出完全不同的硬度。因为纯弹性接触过程，剩余接触面积非常小，传统的定义将导致硬度无穷大。式(2)来源于弹性接触理论，可以被用来解释压头和试样的弹性形变， $\beta$ 为与压头形状有关的常数。对不同形状的压头， $\beta$ 数值不同：

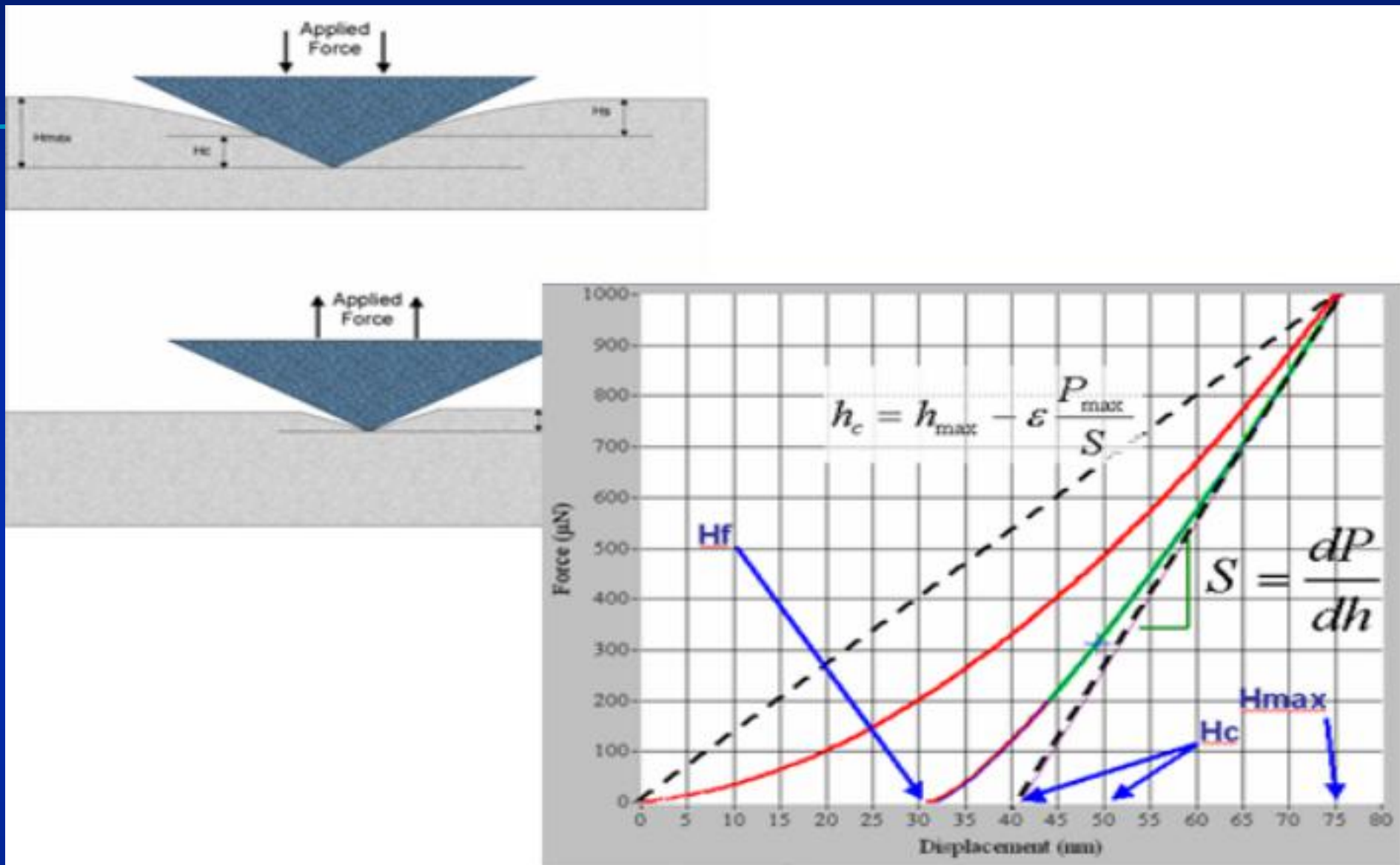


图3 压痕载荷与位移示意图

圆形压头 $\beta=1.000$ ，Berkovich(三棱锥)压头 $=1.034$ ，Vickers压头(四棱锥) $=1.012$ 。被测试样的弹性模量可从下式中获得

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (3)$$

式中 $E$ ， $\nu$ 分别为被测材料的弹性模量和泊松比； $E_i$ ， $\nu_i$ 分别为压头的弹性模量和泊松比。对于金刚石压头 $E_i = 1141 \text{ GPa}$ ， $\nu_i = 0.07$ 。这里，要计算出 $E$ ，必须先知道 $\nu$ 。粗略估计一下，当 $\nu = 0.25 \pm 0.1$ ，对大多数材料的弹性模量 $E$ 仅会产生5.3%的不确定度。所以，在不知道被测材料的情况下，可取 $\nu = 0.25$ ，这样不会引起较大的误差。

为了从载荷一位移数据计算出硬度和弹性模量，必须准确地知道弹性接触刚度和接触面积。通过卸载后的残余压痕照片获得投影接触面积，很不方便，对于纳米尺度的压痕，这几乎不可能。只有通过连续载荷-位移曲线如图2(a)计算出接触面积。目前，Oliver-Pharr法是计算接触面积最常用的方法。这种方法通过如下函数拟合载荷-位移曲线的卸载部分。

$$P = B(h - h_f)^m \quad (4)$$

式中  $B$  和  $m$  是通过测量获得的拟合参数， $h_f$  为完全卸载后的位移。弹性接触刚度便可以根据式(4)的微分计算出

$$S = \left( \frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{\max}} = Bm(h_{\max} - h_f)^{m-1} \quad (5)$$

对于一条拟合的卸载曲线，式(5)不一定总能提供正确的描述。例如，对附着在基底上的薄膜材料，式(5)就不一定总是正确的。在这种情况下，根据整条卸载曲线拟合得到的参量常常导致非常大的误差。因此，确定接触刚度的曲线拟合通常只取卸载曲线顶部的25%~50%。对于弹性接触，接触深度( $h_c$ )总是小于压入深度(即最大位移 $h$ )，由下式计算

$$h_c = h - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (6)$$

式中 $\varepsilon$ 为与压头形状有关的常数。对于球形或棱锥形(如Berkovich和Vickers)压头,  $\varepsilon=0.75$ ; 锥形压头,  $\varepsilon=0.72$ 。虽然式(6)来源于弹性接触理论, 但对塑性变形也符合得相当好。值得注意的是, 式(6)不能说明凸起(pile—up)的塑性现象, 因为假设接触深度总是小于压入深度。接触面积的投影A可由经验公式 $A=f(h_c)$ 计算。对于一个理想的Berkovich压头,  $A=24.56h_c^2$ 。

## 实验样品

- 1 标准样品 (单晶铝和熔融石英)
- 2 类金刚石薄膜

## 实验步骤

1. 开机, 调零, 系统初始化, 仪器预热30min。
2. 放入样品, 寻找光学视场, 即确定Z轴安全极限。 “Video”
3. 设立X, Y轴安全范围, 即操作安全区域, 然后压头快速逼近。 “Safety limits”
4. 扫描图像, 寻找合适的操作点。通过调整扫描速率, 扣除背底以及图像颜色控制等调整图像质量。 “Imagine”
5. 确分析样品的弹性模量, 硬度等值, 分析样品的表面形貌等。
7. 退出系统。定加载载荷, 加载点, 在样品上进行压痕试验。
6. 根据试验结果

# 思考题

---

1. 纳米硬度计的主要功能和应用有哪些？
2. 纳米硬度与宏观硬度、显微硬度有什么区别？
3. 样品表面质量对纳米硬度的测量精度有何影响？

---

# 谢谢！

燕山大学

国家材料综合实验教学示范中心

于金库