

微型加工与显微检查

——重离子的实际应用几例

古 启 迪

一、重离子辐照损伤的径迹

自从微电子学问世以来，人们一直进行着持续不断的努力使之朝更小的方向发展。1979年光刻技术达到了光波所设置的极限。于是开始尝试使用其它射线，人们首先想到的是X射线。软X射线比电子来得优越因为它可以不经散射直接进入对X射线灵敏的底片，给出所要复制的积分线路掩膜完美的、轮廓清晰的投影。受以上思路的启发，用重离子对云母进行了照射，照射后再把云母放在一定的腐蚀剂中进行腐蚀，辐照后所形成的潜在径迹放在40%浓度的氢氟酸中腐蚀20分钟，然后沿径迹方向剖开放在扫描显微镜底下观看就是图1的那种图像。此种径迹的特点是径迹本身的直径只有0.2微米，但是径迹非常的直，长度约为50微米。因此重离子加速器为我们提供非常精巧的“作孔器”其作孔比目前的机械、激光、电子束作孔都要小，进入到了亚微米区。如果能量提高的话，径迹长度可以达到100微米。假定最细的径迹为100埃的话（实际上还可以更细），那么算一下这种“作孔器”的深度与宽度的比，则可以达到 10^4 这个数值。若大的比值只有石油钻井才可与之相比。

另一个有趣的现象是在不同材料中或在不同的腐蚀条件下，所得到的孔可具有不同的形式：圆形、金刚石状、六边形、一开始呈六边形继而变成金刚石状等。

另外，这种“作孔器”以不同的方式钻入材料的深处。其剖面有呈广角锥形；有的是狭长的锥形；更奇特的是：一开始几乎是均匀直径的孔，然后在深部直径又突然加粗。这种不同剖面形成的原因是由潜在径迹及主体材料的不同腐蚀速度、其比值愈大则所作孔的锥形愈小。而孔的形状发生突变是由于材料具有多个不同性质的层次。孔细的那层

主体材料腐蚀速率低，而孔变粗的那层主体材料的腐蚀速率高。

到目前为止，已经知道大凡所有绝缘矿物、塑料中皆能被重离子辐照产生潜在径迹（已知约有150种材料可以贮存径迹）。每一种材料对产生径迹的离子的电荷量有不同的阈值。一般说来，离子愈重对其敏感的材料愈多。

二、重离子“作孔器”的应用

首先一个应用就是制造空前精细的过滤器。这种新型的微孔过滤器，其滤孔的直径可以通过控制腐蚀时间来进行控制；滤孔的分布密度以辐照粒子的照射剂量来进行控制。除了用重离子制作薄膜微孔过滤器以外，亦可以利用反应堆中子通过铀²³⁵裂变碎片对聚碳酸酯进行辐照，然后在温和的氢氧化钠溶液中腐蚀做出薄膜微孔过滤器。商业上提供的微孔可由300埃递增至8微米，滤膜宽度通常可达50公分，长度任意。

微孔过滤膜在细胞学、病毒学、环保学、冶金及食品酿造等方面极为有用。比如，经过一系列观测后发现比三分之二还要多的乳腺癌、结肠癌和直肠癌病人在其病毒尚未转移时，其血液中已可检查出癌细胞了。相反，当癌细胞已转移到淋巴结以后，血液中尚有这种自由活动的癌细胞的病人则不到统计者的十二分之一。这种方法可以用在上述癌症的早期诊断之上。但是要从血液中过滤出癌细胞就得使用微孔过滤膜。图2的照片给出癌细胞被过滤膜所阻隔的情况。

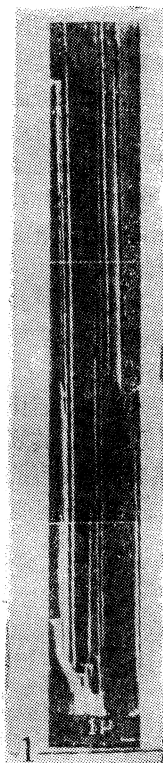


图1 每核子7兆伏的氦离子在云母中所形成腐蚀径迹通道的电子显微镜组合照片

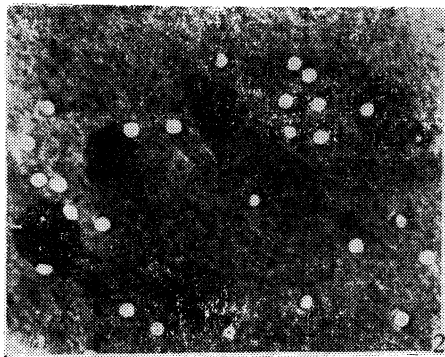


图2 聚碳酸酯薄膜微孔过滤器（白色圆斑为其滤孔，直径~5微米）过滤癌细胞的情况。由于癌细胞既大又硬（黑色圆斑）被过滤器所阻隔而与血球细胞分开。

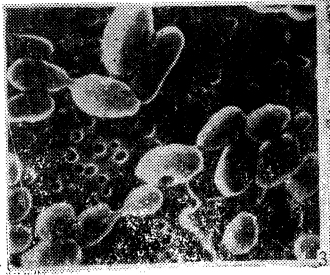


图3 薄膜微孔过滤器把啤酒中酵母过滤出来的情况。葡萄状连接体是酵母菌，背景中黑色圆斑为过滤器的滤孔。

在酿酒业中可用这种微孔过滤器把啤酒或其它酒类中的酵母、细菌与沉淀过滤掉。图3给出微孔过滤器滤出酵母的情况。

把此种微孔过滤膜的微孔填以金属，可以研究特定条件下极细金属的特性。

另一类的应用是可以制造出具有单一精密小孔的薄膜。制备的方法就是把被照射的薄膜用一片具有一个0.1毫米小孔的铁片掩盖起来，当膜后面的探测器记录到一个重离子穿过时就把束流停掉。可以利用此种膜大量制备极具微弱的离子流不影响其他束流使用者。这种具有单一超微小孔的薄膜可以用来对超微粒子按其大小、形状、变形度以及表面电荷进行分类。具体做法是把此种膜作为阻隔片放在两种电解液之间，其中之一含有以上那种要分析的超细微粒。分离效果可通过简单的电阻法或光透射法进行测量来得出。基于此种原理而发展起来的戴·波勒娃——比恩(DeBlois-Bean)计数器^[2]是迄今为止唯一能够在悬浮液中观察单个病毒体的仪器。

另一个应用是用在增加磁光学薄膜的贮存密度，原先此种薄膜的问题是只有大一些的磁畴才是稳定的。经过重离子处理后，在薄膜上可以蚀刻出显微级槽形栅网，从而使不同磁化取向的“小岛状”的区域彼此之间保持稳定。

三、重离子在显微术方面的应用

重离子在材料中遗留下的径迹使人们找到了它另一个有趣的应用方面——显微蚀刻术(Microlithography)。图4给出了其原理说明。根据所得到的立体照片，可以测出腐蚀浮雕的高度。

人们不禁要问，既然这种重离子蚀刻方法最终仍得用电子显微镜进行观察，那何不直接把研究对象放在显微镜下去观察岂不更直接了当？问题是用电子显

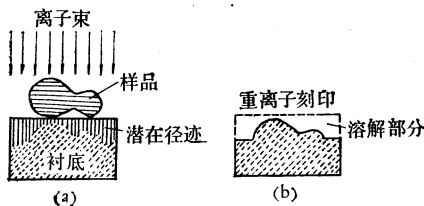


图4 重离子蚀刻的原理图。

微镜时电子在样品内部有散射效应，所以只有观看样品非常薄的切片或者表面才能获得无与伦比的分辨本领。光学显微镜倒可以看人对电子显微镜说

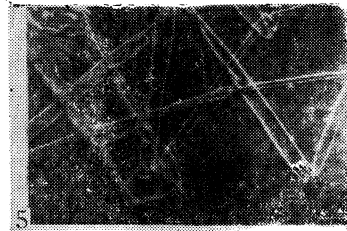


图5 一个小昆虫的重离子蚀刻图，部分组织(腹部和腿)有重叠，可以看出此情况下的密度分布。面密度变化才百分之几亦可看出。

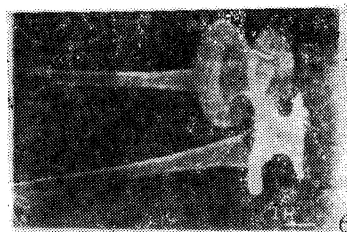


图6 一种针状的不详生物样品的重离子蚀刻图，恰好下面针被弄破，从中可以看出针内部的空心结构。这种图象用电子显微镜是不能观察到的。

来仍厚的样品内部，但分辨本领很差。只有重离子可使我们以较高的分辨本领看厚样品的内部。图5、图6给出了两个例子。

利用重离子作显微的技术其优点是所需辐照的剂量非常小，道理很简单。因为其辐照损伤的长度是确定很准的，所以只要有一个离子就已经可以给出一个特征部位(或叫图象单元)的精确信息。如果特征部位不多，所需的

重离子剂量也就不需要很大。在这一点上重离子蚀刻比电子或X射线进行蚀刻优越。用后两者射线蚀刻，要达到一定的厚度就需要超过一定的剂量阈值。重离子的能量一经确定，其蚀刻物质的厚度就已确定。在用低能重离子进行蚀刻时，蚀刻深度就与重离子的剂量有关。这是小型加速器可以考虑的一个应用领域。此时其分辨本领有所降低。(> 500 埃)。

重离子蚀刻亦可应用于微电子学技术方面，而且几乎所有有关物质皆可被重离子蚀刻(见图7)，其效果至少和X射线或电子相同。而且用重离子蚀刻可把掩模刻在覆有SiO₂的Si片上，不必采取通常的抗蚀镀膜步骤。这点是重离子蚀刻所独有的。

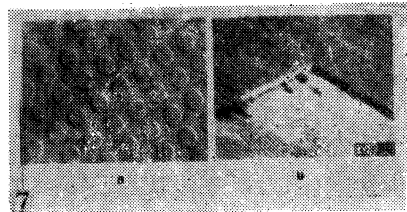


图7 低能重离子在镓和硅上蚀刻的结果，(a)450千电子伏的氙离子以 10^{14} 离子/厘米²剂量通过一个具有直径为200微米小孔的掩膜对镓<1,1,1>面辐照的结果；(b)用555千电子伏， 10^{14} 离子/厘米²的氙离子通过一个具有直角开孔的掩膜对硅<1,1,1>面进行辐照的结果。