

侯 明 东

人类在探索微观世界奥秘的奋斗中永不满足。从本世纪三十年代建造第一台加速器起，不断地扩展加速粒子的质量和能量。现在人们已经能加速元素周期表中从轻到重的所有粒子。有人或许要问为此耗费巨大的资金和精力是否值得。核物理学家的回答是肯定的。用高能的重离子轰击原子核已经展示了许多前所未有的新现象。那么应用领域的前景怎么样？这也是人们所关心的。

什么是重离子束？重离子是指质量比氢离子更重的带电粒子。中性的原子被剥离掉几个电子后形成离子，经过加速器加速使它们具有一定的能量，就成了可供使用的重离子束了。

重离子束对人们并不陌生。离子注入技术在六十年代就成功地应用于半导体掺杂工艺中，目前已成为生产半导体器件和大规模集成电路所必不可少的工艺手段。近二十年来离子注入技术在材料科学中也取得了很大进展，通过离子注入明显的改善了材料表面的硬度和耐磨损性能，增强了抗腐蚀能力，目前已有某些工业应用的实例。重离子束也被应用于微量元素的核反应分析和活化分析中，特别是能给出氢和氮在材料中的含量和分布，对于氢和氮这样的轻元素其他分析手段是无法办到的。

以上这些应用中所使用的重离子束能量都很低（几百千电子伏到几百万电子伏）。一般的注入机和小型加速器都能提供这样的重离子束。目前这样的加速器在我国已较为普遍。而下面所要介绍的则是来自大型加速器的重离子束，它们的能量要比上述的重离子高得多。

看不见的钻头——重离子打孔术

你可能在工厂里看到过工人用钻头在工件上打孔的情形。打大孔很难，打小孔却更为困难。有时是根本无法办到的。这不仅是因为钻头太细了容易折断，还因为机械打孔是靠钻头转动的切削。当钻头很细时尽管转速很高，但线速度仍很低不利于切削，所以机械打孔在孔径上是有个下限的。那么有什么不用钻头打孔的妙法吗？有的，人的智慧是无穷的。打孔不用

钻头早已不是什么新鲜事了。电子束打孔，激光打孔问世已多年，他们分别把打孔尺寸的下限下推了一个和二个数量级。但是要说到当今世界上能打的最细微的孔，还要归属于重离子束打孔。

带有一定能量的重离子穿过绝缘体的薄膜时，沿着它的路径会产生辐射损伤区，这些损伤区极其微小，直径大约几十埃，只有用电子显微镜才能观察到，称之为潜影。如果经过一个适当的显影过程比如在一定浓度的碱溶液中蚀刻处理后，这些潜影就可以变成一个很细的通孔。蚀刻过程起着特别灵敏的放大作用，它把所刻记的信息增大到所期望的大小。这样制得的孔称为核径迹孔，有核径迹孔的膜片称为核微孔膜。

核径迹孔有些什么特点呢？

首先核径迹孔具有精确而可调的直径，它可以毫无困难地适应各种特定的要求，通过控制蚀刻时间可以得到直径从0.01微米直到100微米的孔。要知道0.01微米这是至今所有微观加工手段中所能达到的最精细的尺寸，它比一根头发丝还要细几千倍。

其次同一膜片上的径迹孔取向均匀彼此平行，孔的大小和长度有良好的一致性。核径迹孔有良好的纵向形状，并且孔长与孔径之比可以做到1000比1。如果把这样的孔放大的话，真像一个5米直径而长达5公里的隧道一样。

核径迹孔的面密度可以通过照射剂量而得到严格的控制，甚至可以用单个重离子在膜片上打出一个单孔来。最为有趣的是核径迹孔的横截面形状也可以是多种多样的，这是由于不同材料有不同的晶体结构所决定的。在云母中核径迹孔的横截面是菱形的，在石榴石中是六角形的，在有机膜中是圆形的，而在玻璃中虽然也是圆的但它们沿深度方向却是一个圆锥。

毋庸置疑核径迹孔的生产效率是很高的。利用很小的束流，一下子就可以产生无数的孔。在实际生产过程中，被照射的膜不必静止在那里，而是由滚轴拖着，每秒钟可以照射几平方米的薄膜，特别适于大批量的商业生产。

下表列出了与其他微观加工方法的比较，显示了重离子束加工在最小加工孔径、孔长与孔径比以及生

产效率方面无与伦比的优点。

加工方法	最小孔径 (微米)	长度直径比	生产率 (孔/秒)
机械钻孔	100	10:1	10^{-2}
电子束打孔	10	10:1	10^4
激光打孔	1	1:1	10^3
电子束制版	0.1	1:1	10^4
X 射线制版	0.1	10:1	10^4
核径迹技术	0.01	1000:1	10^9

核微孔膜可以做为性能良好的悬浮微粒过滤器。传统的过滤器一般是由多孔的泡沫或束合纤维所组成,在这些过滤器中孔的直径、孔的长度以及孔的曲折程度都有一个随机的分布,只能使用平均的概念。核微孔膜则是确定孔径的过滤器,并且未能通过过滤器的微粒可以直接在过滤器的表面观查到,而不会停留在过滤器的内部。国外已用核微孔膜过滤啤酒中的酵母菌,制备超纯水,过滤空气中的粉尘及烟雾等等。

核微孔膜还可以做为液体或气体混合物的分离处理的膜片。比如 ^{238}U 和 ^{235}U 的分离,氢的分离和纯化,海水的淡化,电镀及光刻处理中废水处理及贵金属的回收等等。核微孔膜也特别适于有关渗透和半渗透的理论研究。

重离子所打出的单孔膜有更为广泛而有趣的应用。西德阿汉技术大学生理系成功的用 5 微米孔径的单孔膜确定了红细胞的柔软度。大家知道,人体红细胞是一个轮胎形的圆饼,他们的直径大约为 7.5 微米厚度在 1~2 微米之间。在正常的情况下,柔软且有弹性的红细胞通过挤压而经过人体中最小直径约为 3~5 微米的最细的毛细血管是根本没有问题的。但是近

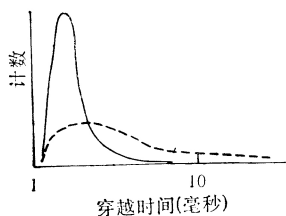


图1 红细胞的穿越时间分布

几年来很多心脏和血液循环系统的疾病追溯到与红细胞的柔软度不够有关,血液在毛细血管网络中流动的研究开始为人们所重视。图1表示了红细胞通过一个单孔膜的穿越时间的测量结果。穿越时间是直接与红细胞的柔软度有关:一个细胞越硬,它穿越孔的时间就越长。可以看出正常的(实线)和不正常的(点线)红细胞是有明显差别的。由此可以给出有关疾病的临床诊断。

此外单孔膜在光学、全息术照相和电子显微镜中做为针孔光栏,在真空技术和质谱仪中刻度漏气速率并作气体喷口,在低温物理中研究液氮中的超流体流动等等都有广泛的应用。

最细的画笔——重离子蚀刻制版

半导体技术的发展中,小型化是一个非常突出的特征。六十年代开始出现在一块硅芯片上包含有几十个晶体管的小规模集成电路,七十年代已发展成包含上万个晶体管的大规模集成电路,现在已能做出包含几亿个元件的超大规模集成电路,也就是说几乎每年集成电路的装配密度都要翻上一倍。随着集成度的增高,造价不断下降,在过去的二十年中电子器件的成本降低到原来的十万分之一。小型化在技术上之所以能实现,应归功于微观加工技术的发展。

从十九世纪开始发展起来的光学蚀刻制版,因使用可见光,其波长限制了加工图形的线条宽度和最小线条间距。最近十年中有了突破性的改善,通过使用紫外光达到了约 2 微米的限度,而用 X 射线和电子束曝光使得显现深宽比为 10:1 的大约 0.1 微米宽度的亚微米结构成为可能。到目前利用可见光、紫外光、X 射线或电子束的这些传统技术所能达到的最终极限至少在实验室的研究中已经达到。所以现在在使用电子束和 X 射线划线技术的同时,人们正在探索重离子束在微结构加工技术中应用的可能性。

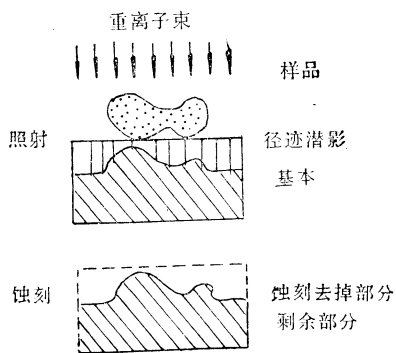


图2 重离子蚀刻制版原理

图2描述了重离子束蚀刻制版的原理。重离子束穿透过样品(或掩模)并以剩余的能量射入放在下面的径迹灵敏的基底上。很好的束流准直是获得良好投影的一个基本条件。通过蚀刻把记录有径迹潜影的部分去掉便显露出一个浮雕。所得到的浮雕的起伏是直接与被投影样品的面密度有关。这个特点使传统的二维的蚀刻制版增加了第三维,使之成为立体的。而 X 射线和电子束没有确定的射程,蚀刻去掉的深度主要是由显影时间决定的,或者一般情况是整个基体的厚度,而没有来自样品面密度的信息。

重离子蚀刻制版的另一个优点是这个技术不局限光灵敏材料作为基底。重离子有很高的损伤密度,几乎任何绝缘材料对它们都是灵敏的。甚至于硅片上本来存在的二氧化硅层也可以做为“光致抗蚀剂”。以二

氧化硅作为径迹灵敏的基体有许多好处，因为硅片上的二氧化硅薄膜的厚度非常均匀，并且厚度可以通过热处理而调整。此外，与有机聚合物相比，二氧化硅是一个直到原子标度都很均匀的材料，所以它具有很高的位置分辨率。

重离子束蚀刻制版使用方便，离子束容易产生和偏转。并且加工出来的结构可以有很大的深宽比，是很有前途的。

显示内脏和肌肉——重离子束照相

重离子束能够像 X 射线透视一样显示出人体内部的病变。

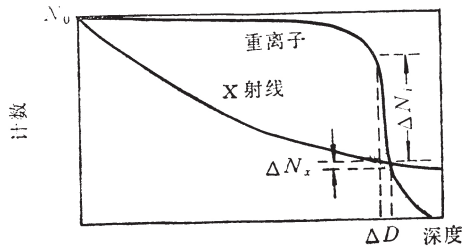


图3 重离子与 X 射线的吸收曲线

重离子在物质中有一定的射程，它们在物质中的吸收曲线如图 3 所示。如果入射 N_0 个离子，在距表面很浅的深度上几乎全部的重离子都没有损失完它们的能量，所以计数并没有减少，而在接近射程的深度，重离子先后损失完它们的能量而停在物质中，所以计数很快下降一直到 0。可以看出在射程末端附近只要物质的厚度有微小的变化 ΔD ，重离子的计数便产生很大的变化 ΔN_i 。X 射线在物质中是按指数衰减的，所以对于同样的物质厚度变化 ΔD ，计数的变化 ΔN_x 却很小。物质厚度的变化相当于物质面密度的变化。因此用重离子照相要比 X 射线更能灵敏地显示出物体密度的变化。

研究表明，重离子照相可以清楚地反映出只有百分之几量级的密度改变。用重离子照相所得到的家蝇的照片甚至可以看到翅膀上细微的纹络。在所拍的老鼠的照片上，不仅显示出骨骼而且也显示了各种内脏和肌肉等软组织。所以完全有可能用重离子照相来研究人体组织、脑结构及肿瘤，它可以凭借瘤与正常组织密度上的差别，断定病灶的存在和位置。

一天等于三十年——重离子模拟中子辐照损伤

你知道吗？金属材料也会生“病”。核反应堆的结构材料长期的处在强的辐射场中，在高通量的中子和裂变碎片的照射下，堆用材料的体积会发生肿胀，患上“浮肿病”。金属材料得了这种“病”，它们就会变脆，强度降低寿命缩短。由于反应堆的安全绝对不容忽

视，所以一个严肃的课题便摆在材料科学工作者的面前：肿胀效应是如何产生的？能否找出新的抗辐射的材料。这个问题不仅是快中子反应堆的设计所关心的，对聚变装置第一壁材料也是重要的。

现在已经知道了辐照损伤的基本过程。离子或中子射入金属材料后与原子发生碰撞。当反冲的原子核所获得的能量大于某一位移阈能时，便离开原有的晶格位置，而运动到一个间隙位置，在原来的晶格位置上留下一个空位，即形成一个空位——间隙原子对。经过碰撞后的入射离子和初级撞出原子，如果它们的能量足够大的话，它们还可以继续与其他原子碰撞，并再次形成各自新的空位——间隙原子对。一直到离位原子的能量低到不能再使别的原子发生离位时，整个碰撞级联过程才停止。碰撞级联过程在金属中形成许多空位和间隙原子，这使原来排列整齐的晶格增添了许多缺陷。这些缺陷是不稳定的，在一定的温度下，空位和间隙原子都要运动和扩散。可能空位和间隙原子相遇通过复合而缺陷消失。但也不可能几个空位运动聚集到一起形成空位团，再进一步一些空位团又可能聚集形成微空洞或空洞。于是金属得“病”了。

但在实际上辐照损伤是一个极为复杂的问题，描述原子碰撞过程的模型都是近似的，特别是在碰撞级联的末期，一个高温高压区域的形成和崩塌等非平衡过程，许多参数都是未知的，迫切的需要实验提供大量的数据。将堆用材料放在反应堆中用中子照射是研究材料抗辐射性能的最直接的方法。但是以目前反应堆的中子通量(大约 10^{15} 中子/(厘米²·秒))来估计，这种试验要花几年的时间。不仅耗资大，单就这样的时间也是不能等待的。

用重离子束来模拟中子的辐照损伤是一个好办法。重离子与靶材料原子有相当大的碰撞截面，而且在一次碰撞中能够把更多的能量交付给反冲原子，因此所产生的离位原子密度要比中子高许多倍。重离子在加速器中大约 100 米长的加速路程上所获得的能量，当它们射入固体时仅仅十分之一毫米深便全部释放出来，形成了至今所能达到的最强烈的辐射损伤。它造成损伤的功率要比中子高几万、几十万倍。因此可以说在较小的空间尺度，在较短的时间间隔，重离子再现了中子辐照损伤的过程，通过这种模拟试验，可以在很短的时间就能获得在快中子反应堆中材料长期辐照性能的资料。

一条崎岖的小路——重离子束引发可控聚变反应

二十世纪跨入了原子能时代，核裂变所释放出的能量已为人类所掌握。现在世界上已有三百多座核电站在运行，在某些国家核电站所提供的电能已超过总电量的 50%。但是核裂变也不是理想的能源，除开核

安全性而外废物处理是一个严重问题,需要高超的技术和高昂的代价。

现在人们寄希望于聚变反应。二个轻核如氘氚结合为较重的氦核时会释放出比裂变大几倍的能量。聚变反应没有放射性废物,它的燃料氘可以从普通海水中提取,实际上是取用不尽的,因此是一种理想的干净的能源。但是氘-氚反应需要1亿度的高温才能自持。受控聚变反应的关键问题是氘等热核燃料的约束和加热。根据劳森判据,等离子体密度 n 和被约束的时间 τ 之积必须大于 10^{14} 秒/厘米³。只有 n 和 τ 达到劳森判据,所用的热核燃料达到适当的温度,等离子体才会产生与自持反应耗能相当的能量,这种临界平衡称之为“热核点火”。

重离子束引发可控聚变反应的设计思想是相当新颖的,加热和约束的方法是完全不同于迄今最受重视的托卡马克型装置。托卡马克是环形闭合聚变装置,缠绕在反应容器上庞大的线圈所产生的磁场把等离子体约束在螺旋形轨道上,并用等离子体中的感生电流加热等离子体到高温。在重离子束引发方案中采用的不是磁约束而是惯性约束。将冷冻的氘氚混合物制作成一个燃料靶丸,用静电把它悬浮在容器的中心,然后用中能重离子束同时从四面八方轰击靶丸。靶丸的外壳受到剧热而骤然汽化,所发生的冲击波迅速地集中

于燃料上,靶丸外围的氘氚混合物在高温高压作用下首先达到“点火”聚变反应,所产生的热量又继续向内压缩,使整个靶丸引起聚变。整个过程将在1毫秒内完成,过程进行得如此之快,“点火”温度达到后在氘氚物质还来不及飞散就已经完成了全部的聚变反应。所释放出的能量由快中子以动能形式带到球形聚变区外围的锂再生区内,中子在锂中慢化释放出大量的热能,同时中子与锂的核反应又可生产用作燃料的氘。最后锂中的热能通过热交换器产生推动汽轮发电机的高压蒸汽。

重离子束引发装置无需庞大的磁铁线圈,不仅经济而且易于适应发电这项最终任务。较之其他引发束也有其特点。重离子束的能量沉积密度高,热量可在深度方向上高度集中,这是激光束、电子束以及质子束所无法达到的。此外产生重离子束的加速器的能量转换效率也比激光产生器要高,这将使整个聚变系统的净能增益提高。但是重离子引发聚变反应在技术上还存在一系列的难关,如靶丸的设计,引发重离子强流加速器的设计,聚变容器的设计等等。总之征服受控聚变反应是当代重大的研究课题,有多种可能的途径,用重离子束引发可控聚变反应只是其中一条崎岖的小路,虽然目前尚不知它是否能通到顶峰,但科学工作者却仍在这条小路上坚持不懈地攀登着。