

图9 硅中注砷样品在热退火后的背散射能谱  
 实验条件: Si<111>; 150千电子伏, As;  $1 \times 10^{16}$  原子/厘米<sup>2</sup>; 室温; 900℃, 半小时热退火处理;  $E_{He} = 2.0$ 兆电子伏;  $Q = 10$ 微库;  
 ● 随机取向谱; ▲ <111> 定向谱;  
 ○ 离子注入前 <111> 定向谱

此样品在氮气氛中经 900℃ (半小时) 热退火处理以后, 再测 <111> 轴定向谱 (见图 9), 由图 9 可见, 定向谱上晶体表面损伤峰大大下降, 因而晶格损伤得到了恢复, 将此能谱上残留的表面峰和离子注入前定向谱的比较可以算出残留的损伤量。残留损伤量为  $\sim 4 \times 10^{16}$  散射中

心/厘米<sup>2</sup>。

注入晶体中的离子可能处于替位, 也可能处于间隙位。若要得到良好的电性能, 则处于替位的比例要高 (即替位率)。从随机谱和定向谱上 As 离子的背散射峰可以得到 As 离子的替位率。对于那些处于间隙位置的注入离子, 不论是随机谱还是定向谱都能测到; 相反, 对于处于替位的那些注入离子, 只有随机谱才可能测到, 通过两者的比较, 即能求得替位率。在图 8 中可以看到, 热退火处理前, 定向谱上 As 峰的面积和随机谱中 As 峰面积几乎相同。由图 9 可见, 经退火处理以后, 定向谱中 As 峰面积比随机谱中 As 峰面积大大减小, 由此面积比较可算得 As 离子的替位率。此样品的 As 离子替位率  $\sim 76\%$ 。

### 参 考 文 献

- [1] J. F. Ziegler, *New Uses of Ion Accelerators*, Plenum Press, New York, (1975).
- [2] J. S. Williams, *Nucl. Instr. and Meth.*, **126**(1975), 205.
- [3] W. K. Chu, J. W. Mayer and M. A. Nicolet, *Backscattering Spectrometry*, Academic Press, New York, (1978).

## 单层表面分析方法——低能离子散射和静态二次离子质谱

赵良仲

(中国科学院化学研究所)

固体材料的表面特性, 例如电子或离子的表面发射或表面吸收, 分子的表面吸附, 以及表面化学反应等, 取决于材料的表面层, 特别是最外原子层的组成和结构。自六十年代末期以来, 研究表面组成和结构的方法已获得迅速发展<sup>[1]</sup>。这些方法的信息深度范围一般为 1—10 个原子层, 其中低能离子散射和静态二次离子质谱可用于单层表面分析。这两种方法都是用离子束来探测表面的, 和用电子束入射的情形类似, 用离子束入射时也能引起四种类型的粒

子发射: 离子散射和二次离子发射; 中性粒子溅射; 电子发射和光子发射。这些发射原理已构成多种表面的研究方法, 见图 1。在这些方法中, 分析散射离子能量的方法叫离子散射能谱法, 分析二次离子质量的方法叫二次离子质谱法。由于用离子束入射时的穿透深度比电子还浅, 所以在原理上它很适用于表面分析。但是和电子束入射时不同, 离子由于有较大的质量, 因此入射时与表面原子之间有较强的动能交换, 它能造成表面原子溅射, 从而破坏表面。

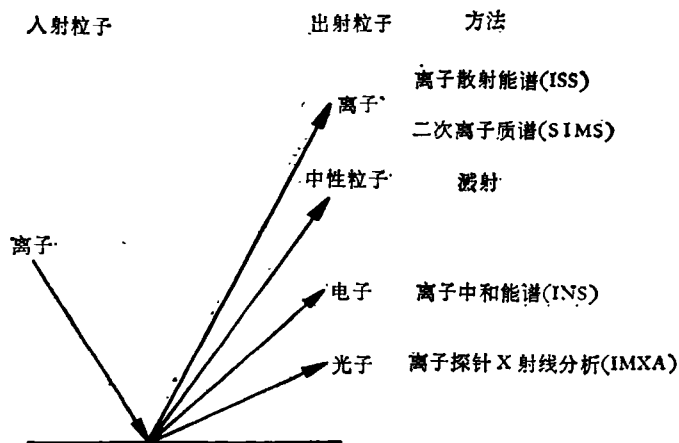


图1 离子束入射固体表面时引起的粒子发射和相应建立的分析方法

鉴于这一个原因,在很长一段时间内,人们认为离子束入射的方法不适用于单层表面分析。但是后来通过实验技术上的改进,事实已经表明,只要使用低能量低束流密度的离子束入射,这种溅射破坏效应便可减至最小,表面单层的检测不仅可能,而且十分灵敏。为了区别于能量较高的离子散射法和束流密度较大的二次离子质谱法(它们的信息深度大于1个单层),人们通常把入射离子能量低于3keV的离子散射法叫低能离子散射法,把低入射束流密度(约 $10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup>)的二次离子质谱法叫作静态二次离子质谱法。

### 一、低能离子散射法

1967年,Smith用0.5—3.0keV的惰性气体离子轰击多晶钼和镍表面,分析散射离子的能量分布,从中获得了表面组分和结构方面的信息。这种方法的信息深度只有1—2个原子层,适用于单层表面分析<sup>[2]</sup>。

#### 1. 基本原理

当惰性气体离子入射到固体表面时,表面会发生各种复杂的过程,形成如图1所示的各种粒子发射。在此着重讨论入射离子发生散射的情形。

为了描述离子散射过程,Smith作了下述简化假设<sup>[2,3]</sup>:(1)假定靶原子是自由的,即碰

撞时没有周围原子的影响。这一假设可以预期是合适的,因为“碰撞时间”大约是 $10^{-16}$ — $10^{-15}$ sec,它比晶格振动周期(大约 $10^{-13}$ sec)短得多。(2)假设靶原子不振动,即晶格是冷的。室温时固体中原子的振动能大约是0.04eV,因而可以忽略。(3)假设碰撞时由于电子跃迁等电场作用引起的能量损失可以忽略,因为事实上它很小。根据能量守恒定律可以推导出

$$E_1/E_0 = (1 + \alpha)^{-2} [\cos\theta + (\alpha^2 - \sin^2\theta)^{1/2}]^2, \quad (1)$$

式中 $\alpha = m_2/m_1$ ,  $m_1$ 是入射离子质量,  $m_2$ 是靶原子质量,因为反冲现象,测量时要求 $m_2 > m_1$ ;  $E_0$ 是入射离子碰撞前的动能,  $E_1$ 是入射离子碰撞后的动能,  $\theta$ 是入射离子的散射角。如果 $\theta = 90^\circ$ ,则

$$E_1/E_0 = (m_2 - m_1)/(m_2 + m_1), \quad (2)$$

$$m_2 = m_1 \left(1 + \frac{E_1}{E_0}\right) / \left(1 - \frac{E_1}{E_0}\right). \quad (3)$$

$m_1$ 和 $E_0$ 是已知的,  $E_1$ 可以测得,如果以上模型成立,则可以根据(3)式通过简单计算求得 $m_2$ 。图2是1.8keV的He<sup>+</sup>, Ne<sup>+</sup>和Ar<sup>+</sup>撞击多晶钼表面得到的散射离子能谱,散射角是90°。

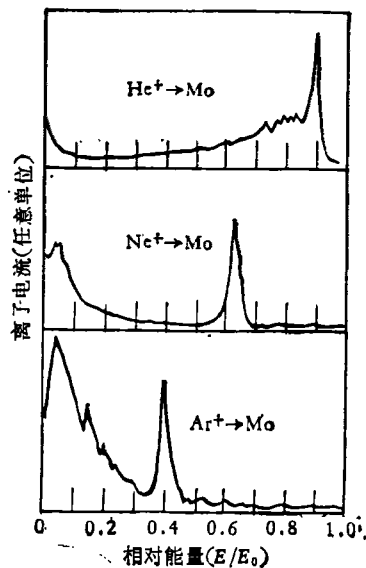


图2

由图可知,每个谱图都包含两类离子,一类离子能量较低,范围较宽,其能量与质量比基本上无关。它们是表面发射的二次离子。另一类是表面散射的入射离子,它们的能量较高,其数值取决于质量比。因为实验条件是  $\theta = 90^\circ$ ,  $m_2 = 96$ ,  $m_1$  分别是 4, 20, 40。如果方程 (2) 成立,则  $E_1/E_0$  应该分别等于 0.920, 0.655 和 0.411。从图 2 可知,实验所得的数据与从方程 (2) 计算得到的数值符合得相当好,这就说明上述简单的两体弹性碰撞模型来描述惰性气体离子与固体表面原子的碰撞作用是有效的。但是这种模型不适用于活性气体离子。图 3 是 1.8 keV 的  $\text{He}^+$  和  $\text{H}_1^+$ ,  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{H}_3^+$  从多晶金表面散射的能谱,散射角是  $90^\circ$ 。可以看到惰性气体离子  $\text{He}^+$  的散射峰很尖锐,其相对能量  $E_1/E_0$  与 (2) 式基本符合。活性气体离子  $\text{H}_1^+$ ,  $\text{H}_2^+$  和  $\text{H}_3^+$  的散射峰很宽,在低能端拖着一条“尾巴”,“尾巴”处的离子已失去不同数量的能量,其值都大于  $E_0 - E_1$ 。这种差别是由于它们在表面的中和几率不同造成的。活性气体离子中和几率较低,因此有可能在表面层内经历多次碰撞并且

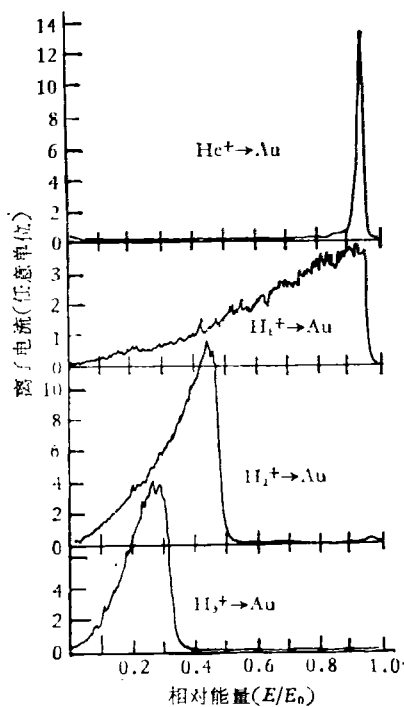


图 3

失去不同能量;惰性气体离子中和几率较高,发生多次碰撞的机会要少。

在低能离子散射法中,离子中和效应起着重要的作用。部分入射离子在表面头一、二个原子层处被中和,因此在散射粒子中,除离子以外,有相当大的一部分是中性粒子。惰性气体离子的高中和几率是造成这种技术有低的透射深度和高的表面灵敏度的重要因素。但另一方面,由于低能离子散射一般采用静电能量分析器分析不同能量的离子,它不能分析中性粒子,因此高中和几率也带来实际收集到的散射离子剂量低的缺点。离子中和几率与入射离子能量及散射角等有关,但是定量关系尚不明确。

## 2. 离子散射能谱仪

低能离子散射谱仪的主要部件有离子源,离子能量分析器,离子检测器和有关的电子学线路。离子源产生的单能离子束通过狭缝打到样品靶子上,分析器分析具有一定散射角的散射离子,然后被检测器检测,见图 4。由于这种技术对表面很灵敏,所以要求散射室内真空度优于  $1 \times 10^{-9}$  托。

离子源通常用电子束轰击压力为  $10^{-3}$  托至  $10^{-5}$  托的惰性气体 (He, Ne 或 Ar) 而产生。生成的离子用一个磁或静电透镜聚焦成束。对离子源的要求是能量宽度要小,一般不大于几个 eV; 离子流强度至少应达几个  $\mu\text{A}$ ; 离子束的发散角应小于  $\pm 1^\circ$ ; 离子的纯度要高,杂质离子由于质量不同或带电态不同(加速后变成不同能量)将造成附加峰。常用的离子束能量范围是 0.5—2keV。

分析器分析预定散射角的散射离子。它的作用相当于能量/电荷过滤器。通过对分析器板极之间的电压作步进或连续扫描,对应于  $E_1/q$  的散射离子被分析和检测。例如对于曲面板分析器,能量和分析器电压之间的关系是

$$E_1/q = V_a R/2d,$$

$E_1$  和  $q$  分别是通过分析器的离子的能量和电荷,  $V_a$  是分析器两板极之间的电位差,  $R$  是板极的平均半径,  $d$  是两板极间的距离。内、外板极的电位分别为  $-V_a/2$  和  $+V_a/2$ , 因此分析

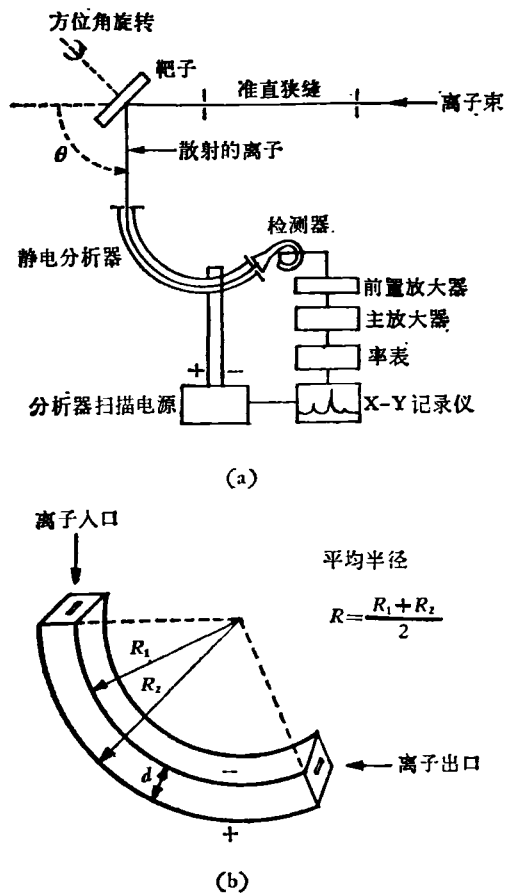


图4 (a) 离子散射能谱仪示意图;  
(b) 曲面板分析器示意图

器的中心轨道处于基电位。如果  $R = 10\text{cm}$ ,  $d = 0.5\text{cm}$ , 则当  $V_a = 10\text{V}$  时,  $100\text{eV}$  的单带电散射离子通过分析器, 同样此时  $200\text{eV}$  的双带电离子及任何具有  $E/q = 100\text{V}$  的其他离子也通过分析器。这种静电分析器还可采用其他型式, 如半球形, 扇形, 甚至还可以与俄歇电子能谱仪结合, 使俄歇谱仪中的筒镜型分析器倒转极性以后分析低能离子<sup>[4]</sup>。

检测器通常用通道电子倍增器或 Cu-Be 打拿极电子倍增器。由于它们对于低能离子的检测效率较低, 所以离子从分析器出口狭缝出来时通常受到加速, 例如在倍增器输入端加上  $3000\text{V}$  负偏压。

由于这种方法的信息来自离子的能谱, 所以应当考虑影响能量分辨率的所有因素。入射离子束的能量展宽主要来源于离子源和加速电

压电源。角度发散取决于准直狭缝的大小和距离, 也取决于离子光学系统中的磁或静电透镜性能。离子束附近的杂散磁场应屏蔽至尽量小。一般来说,  $1-3\%$  的能量分辨率是有可能达到的。

### 3. 主要应用及其特点

低能离子散射的主要应用是表面组分分析。在散射离子能谱图中得到峰值处的相对能量  $E/E_0$  后, 便可以按方程(1)或方程(3)计算  $m_2$ , 确定样品靶表面的元素种类。由于方程(1)~(3)应该满足  $m_2 > m_1$  的条件, 因此一般选择  $\text{He}^+$  作为入射离子, 这样可以分析较轻的元素。但是, 当分析较重的元素时, 为了增加质量分辨率, 应选用较重的人射离子(如  $\text{Ar}^+$  或  $\text{Ne}^+$ )。图5是从 Au-Ni 合金表面散射的  $\text{He}^+$  和  $\text{Ne}^+$  的能谱, 可以看到用  $\text{Ne}^+$  入射时分辨率要好得多。图6是  $\text{Ar}^+$  在洁净多晶 Cu 表面的散射能谱<sup>[5]</sup>。不对称的峰显示了  $\text{Ar}^+$  从  $\text{Cu}^{63}$  和  $\text{Cu}^{65}$  同位素上的散射, 重迭的曲线是从天然 Cu 同位素丰度预期的曲线, 二者基本符合, 在这个例子中, 质量分辨是 2 个原子质量单位。

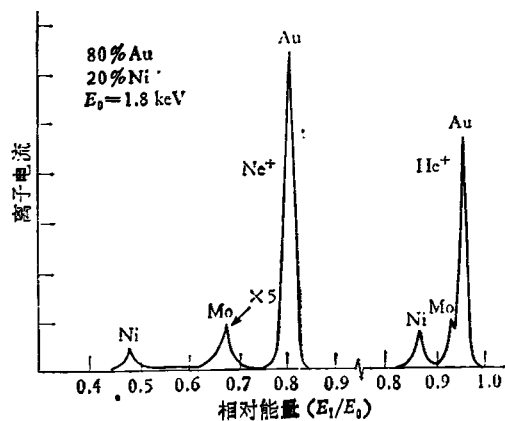


图5 从 Au-Ni 合金散射的  $\text{He}^+$  和  $\text{Ne}^+$  的能量分布, 合金表面有少量分凝的 Mo

离子散射能谱的物理基础较简单, 因此存在定量分析的前景, 但是目前还有些困难。散射离子的强度  $I$  取决于散射截面  $\sigma$ , 未被中和的离子散射几率  $P^+$  和最外层的原子密度  $N$  等因子,

$$I \propto \sigma P^+ N,$$

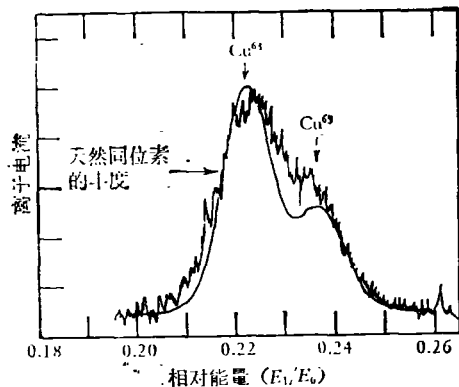


图6 同位素  $\text{Cu}^{63}$  和  $\text{Cu}^{65}$  的  $\text{Ar}^+$  散射能谱, 入射离子能量是  $1.5\text{keV}$

散射截面  $\sigma$  是离子和靶原子之间相互作用电位的函数。假如这种相互作用电位知道, 则散射截面可进行理论计算。高能离子 (MeV 范围) 散射时该电位就是简单的库仑电位, 但低能离子散射时该电位不很明确。未被中和的离子散射几率  $P^+$  与表面条件有关, 它也常常是不明确的。这些因素是低能离子散射用于定量分析的主要难题。其他因素如“遮蔽效应”和非弹性散射等也影响定量分析。因此在实际测量中通常使用标准样品校正或与其他方法对照<sup>[6]</sup>。显示这种方法定量潜力的一个例子是用  $\text{He}^+$  分析  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Al 得到的散射离子能谱, 见图 7<sup>[5]</sup>。样品是纯铝在空气中经过充分氧化使其表面生成一层  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。先用  $\text{He}^+$  散射分析  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 记录 Al 和 O 的散射峰, 再用离子溅射除去  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层, 记录 Al 的散射峰。从图 7 中可以看到 Al 峰的高

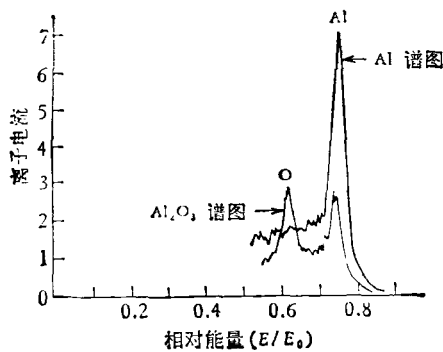


图7 纯 Al 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的离子散射能谱, 入射离子是  $\text{He}^+$ , 能量是  $1.8\text{keV}$

度符合  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和纯 Al 中 Al 的原子密度, 即散射离子信号强度直接正比于表面的原子数。

在少数情形下, 低能离子散射还能提供表面结构方面的信息。例如, 由于它的信息来自外表面 1—2 个原子层, 如果表面被一层其他原子覆盖, 则次层原子受到“遮蔽”, 它的散射离子信号将会显著减小, 利用这种“遮蔽效应”有时可以分析表面层结构, 即分析原子的位置或分子的排布。图 8 是  $\text{He}^+$  从吸附有 CO 的多晶 Ni 表面的散射能谱。CO 分子中 C 和 O 的原子比例是 1:1, 而它们的散射峰强度是 1:5。红外光谱和电子衍射研究表明, CO 在多晶 Ni 表面吸附时是 C 原子键合到 Ni 原子上去的, 这时 O 原子向外伸出, 第一个原子层主要是 O, C 原子被 O 原子遮蔽, 所以 O 原子信号大大高于 C 原子信号。

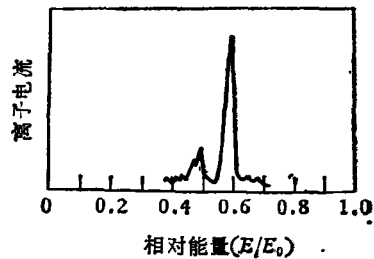


图8 多晶 Ni 表面上的 CO 的离子散射能谱, 入射离子是  $1.8\text{keV}$  的  $\text{He}^+$ ,  $\theta = 90^\circ$

低能离子散射作为一种单层表面分析方法的特点可以归纳如下: (1) 它的信息深度为 1—2 个原子层; (2) 主要用于表面元素种类分析, 不能分析化合物种类; (3) 元素分辨率大约是 2 个原子质量单位, 其分辨率和入射离子与样品原子的相对质量有关, 可选择入射离子质量来改善分辨率; (4) 检测不同的元素时灵敏度变化较小, 一般不到一个数量级, 最高灵敏度可以分析  $10^{-4}$  个单层; (5) 借助于校正可以做定量分析, 增加入射离子束流密度可以做纵深分析; (6) 主要缺点是谱峰不够尖锐, 多组分存在时不同元素的峰有可能互相重叠, 以致漏检低浓度元素。

## 二、静态二次离子质谱法

静态二次离子质谱是由 Benninghoven 在最近十年中发展起来的<sup>[7]</sup>。与通常的二次离子质谱不同，这种方法是在超高真空条件下用很低的人射离子束流密度和较大的离子轰击面积，把二次离子质谱推广应用于单层表面分析。由于这种方法有一些独特的优点，所以日益受到重视。

### 1. 基本原理

前面讨论了用惰性气体离子入射固体表面时发生的散射过程，与此过程一起发生的还有其他各种粒子的发射，在这里讨论二次离子发射。当入射离子射入固体表面以后，它的能量转移到晶格里，其中一部分能量传递给表面粒子，并且使之发射出来。在这一过程中伴随有复杂的电离现象（如正离子的形成伴随有俄歇电子发射），因此发射的粒子除中性粒子外还有正的或负的离子。这种过程通常称为“动力学发射”，用惰性气体离子入射时主要是这种过程。如果入射离子引起样品表面原子的化学键断裂，这能引起离子的直接发射。当用化学性质活泼的离子入射时，这种效应尤其显著。关于二次离子发射的物理过程，目前还不能说已经有了充分的了解。

二次离子的能量跟原子序数及入射离子的能量有关。当入射离子的能量是几个 keV 时，二次离子的平均能量通常只有几个 eV。由此可见，二次离子只能从表面单分子层中发射出来，如果二次离子是分子离子，则更加明显。

二次离子的产额既跟入射离子的种类、能量和入射角有关，又跟被轰击表面的元素组成、原子的几何排列和成键性质有关。

因为要用静态二次离子质谱分析单层，所以让我们考虑单层的溅射。设  $N$  是粒子的面密度， $N_0$  是完整单层中粒子的面密度， $\delta$  为表面相对覆盖度，定义  $\delta = N/N_0$ ，即完整单层时  $\delta = 1$ ， $\delta(0)$  和  $\delta(t)$  分别表示时间等于 0 和  $t$  时的相对覆盖度， $S$  为总的溅射产额，即每个人

射离子从表面溅射出来的粒子数， $i_p^+$  是入射离子电流密度， $\nu$  是入射离子通量密度， $\nu = i_p^+/e_0$ ， $e_0$  是单位电荷。在  $dt$  时间内，粒子面密度变化  $dN$  为

$$dN = \nu S \delta(t) dt.$$

$dN$  与相对覆盖度的变化  $d\delta$  有下述关系：

$$d\delta = dN/N_0,$$

因此

$$d\delta = \delta(t) \frac{\nu S}{N_0} dt.$$

对上式积分得到

$$\delta(t) = \delta(0) \exp(-t/\bar{i}),$$

其中  $\bar{i}$  是最外单层的平均寿命，

$$\bar{i} = N_0/\nu S.$$

显然单层的平均寿命取决于溅射产额和离子通量密度。当入射离子电流密度是  $10^{-11}$  A/cm<sup>2</sup> 时，单层的平均寿命  $\bar{i}$  大约是十分之几秒。如果把入射离子束流密度降低 5 个数量级（即  $10^{-16}$  A/cm<sup>2</sup>），则  $\bar{i}$  将达到  $10^6$  sec。因此用这样小的束流密度入射时，记录一个谱后，单层的溅射破坏可以忽略。当然降低入射离子束流密度会导致二次离子电流减小。为了补偿这一点，在测量时，把被轰击的面积扩大到 0.1 cm<sup>2</sup> 左右。

检测器记录到的二次离子电流  $I'(X_n, t)$  为

$$\begin{aligned} I'(X_n, t) &= i_p^+ AS(X_n) \delta f \\ &= i_p^+ AS(X_n) f \delta(0) \exp(-t/\bar{i}), \end{aligned}$$

上式中  $S(X_n)$  是二次离子  $X_n$  的产额，即每个人射离子激发出来的二次离子数目。 $f$  是质谱仪的透射率， $A$  是靶子面积。因此如果入射离

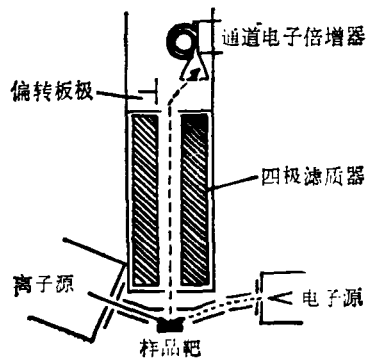


图 9

子束和透射率是常数, 则对于单层表面结构而言, 二次离子电流与时间存在上述指数依赖关系<sup>[8,9]</sup>。

## 2. 静态二次离子质谱仪

静态二次离子质谱仪由入射离子源、靶室、质量分析器、检测器等部件构成, 见图 9。入射离子激发出来的二次离子进入质量分析器分析, 然后被检测器检测, 信号输入记录显示系统。对惰性气体离子源的要求和低能离子散射法相同, 离子束流密度通常为  $1 \times 10^{-9} \text{A/cm}^2$  左右, 离子能量 3 keV 左右或更低。靶室中要求达到  $10^{-10}$  至  $10^{-11}$  托的超高真空, 离子轰击的靶子面积通常为  $0.1 \text{cm}^2$  左右。质量分析器一般用高透射的四极滤质器<sup>[10]</sup>, 它由二组平行并且对称的金属杆组成。二组电极产生的射频四极电场可使某种质量的离子在场中稳定振荡并达到检测器, 其他离子振荡时因振幅增大而被四个电极之一吸收。改变电场参数可以检测不同质量的离子。检测器常用通道电子倍增器, 以脉冲计数方式工作。

## 3. 主要应用及其特点

静态二次离子质谱的主要应用是表面元素组成和化学组成分析。例如图 10 是表面有碳氢化合物等污染的钼靶的静态二次离子质谱<sup>[11]</sup>。从正二次离子质谱图中可以看到来自氢和含氢化合物的离子  $\text{H}^+$  及  $\text{H}_2^+$ ; 来自污染物  $\text{H}_2\text{O}$  的分子离子  $\text{H}_2\text{O}^+$ ; 来自碳氢化合物的各种分子裂片  $\text{C}_m\text{H}_n^+$ ; 来自氧化钼的离子  $\text{Mo}^+$  及  $\text{MoO}^+$  等。从负二次离子质谱图中可以看到来自污染膜的  $\text{H}^-$ ,  $\text{O}^-$  和  $\text{OH}^-$ ; 来自硝酸盐络合物的  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NO}_3^-$ ; 来自氧化钼的  $\text{MoO}_2^-$ ,

$\text{MoO}_3^-$  和  $\text{MoO}_4^-$  等。如果增加入射离子束流密度就可以除去污染分子层, 实现纵深分析。

除表面单层检测以外, 静态二次离子质谱还用于研究气体-固体的表面化学反应, 如研究氧化过程等<sup>[12,13]</sup>。

静态二次离子质谱用于表面单层分析的主要特点是: (1) 信息深度为 1—2 个单层; (2) 可以检测包括氢在内的所有元素; (3) 可以检测化合物; (4) 有极好的元素分辨本领, 不仅可

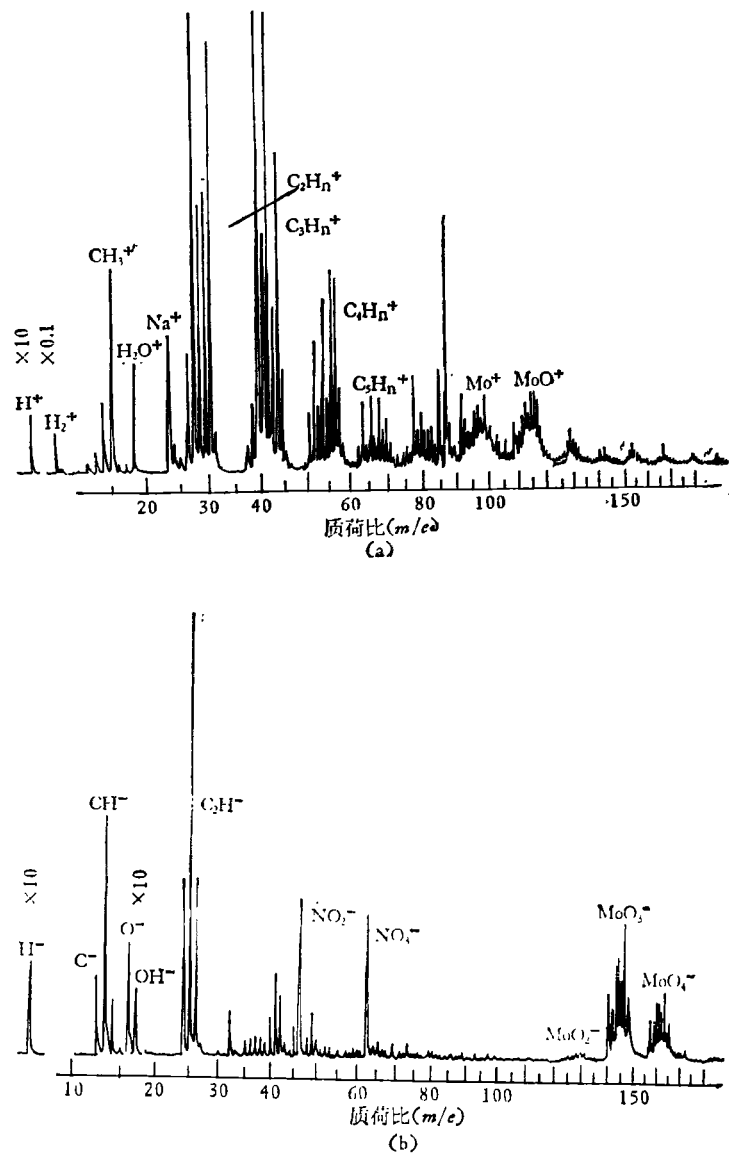


图 10 钼靶最外单层的二次离子质谱。(a) 为正离子质谱, (b) 为负离子质谱。入射离子是  $\text{Ar}^+$ , 3keV,  $1 \times 10^{-9} \text{A/cm}^2$ 。靶室压力为  $10^{-9}$  托, 记录一个谱图后单层除去 1%

以分辨每种元素,而且可以区分同位素;(5)对于许多元素和化合物,它有极高的检测灵敏度,检测极限低于 $10^{-6}$ 单层;(6)可以做纵深分析;(7)主要缺点是,对于不同的元素或不同的表面结构检测灵敏度变化很大,二次离子产额有时可以相差4—5个数量级,这使定量分析复杂化。近年来已经在研究,用能量更低(约500eV)的离子入射的静态二次离子质谱用于单层范围吸附层的定量分析的可能性<sup>[14-16]</sup>。

总之,这两种方法都是单层表面分析技术,它们在半导体、催化、表面电子器件、冶金等领域中用于研究表面吸附、表面污染、表面分解和表面反应等方面是很有用的。

### 参 考 文 献

[1] A. W. Czanderna, *Methods of Surface Analysis*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.

[2] D. P. Smith, *J. Applied Physics*, **38**(1967), 340.  
 [3] D. P. Smith, *Surface Science*, **25**(1971), 171.  
 [4] H. Niehus et al., *Surface Science*, **47**(1975), 222.  
 [5] R. F. Goff et al., *J. Vacuum Sci. Technol.*, **7**(1970), 72.  
 [6] E. Taglauer et al., *Applied Physics Letters*, **24**(1974), 437.  
 [7] A. Benninghoven, *Surface Science*, **28**(1971), 541.  
 [8] A. Benninghoven, *Surface Science*, **35**(1973), 427.  
 [9] A. Benninghoven, *Surface Science*, **53**(1975), 596.  
 [10] A. Benninghoven et al., *Rev. Sci. Instr.*, **42**(1971), 49.  
 [11] A. Benninghoven, *Appl. Phys.*, **1**(1973), 3.  
 [12] A. Muller et al., *Surface Science*, **41**(1974), 493.  
 [13] A. Benninghoven et al., *Surface Science*, **41**(1974), 483.  
 [14] P. H. Dawson, *Phys. Rev. B*, **15**(1977), 5522.  
 [15] P. H. Dawson, *Surface Science*, **57**(1976), 229.  
 [16] P. H. Dawson, *Surface Science*, **65**(1977), 41.

## 在热噪声中的脉冲引力波的检测

吴永生

(中国科学院物理研究所)

### 一、引 言

探测引力波的原理,类似于接收电磁波,大家都知道带电粒子在电磁波的作用下会被激发而产生振动。一个质量块在引力波的作用下,它的各个质点也会产生“颤动”,从而使整个质量块产生机械形变。这种形变可以通过压电晶体等传感器转化为电信号后记录下来。但由于引力常数极为微小,引力波接收天线所接收到的引力波信号能量将大大低于天线的热噪声能量。而且根据理论上的预测,能够辐射强大引力波能量的天体活动过程是引力捕获和引力坍缩<sup>[1]</sup>,这种过程是脉冲性的,前后持续仅几个毫秒,振动方向改变二到四次。现在采用的引力波接收天线一般都是内耗很小的合金铝,因此

它的输出噪声频宽很窄,相关时间很长,这样就不能利用信号的相关性和噪声的不相关性来积累信号信息,排除噪声干扰。总而言之,短脉冲引力波信号的探测需作特殊的考虑。

### 二、天线的热噪声

一个最简单的四极子引力波探测器可以设想为是由间隔 $l$ 并用弹簧联接起来的两个质量块组成,在引力波的作用下,这两个质量块将作谐振动。质量块和弹簧不一定要独立地存在,它们可以用一根实心金属棒代替。目前流行的是用一根重一至五吨的合金铝棒作天线,把它吊在通过严格减震和电磁屏蔽的真空筒里。对于这样的系统,我们可以用下面的方程近似描述它在引力波作用下的运动: