

# 溅射的同位素迷惑\*

郑里平

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘 要** 影响多元材料溅射的机制是复杂的. 在多元材料溅射中, 同位素溅射是最简单的. 虽然仅有质量效应在同位素溅射中起优势作用, 但是在离子轰击溅射中, 至今仍然是个“同位素迷惑”. 争论的焦点有: (1) 在零剂量时, 同位素富集度是与出射角无关, 还是与出射角有关? (2) 同位素角效应是一次溅射效应, 还是二次溅射效应? 如何理解碰撞级联中的动量不对称性对同位素溅射的作用? 文中综述了这些争论, 并阐明了本小组的观点.

**关键词** 同位素富集度 一次溅射效应 二次溅射效应

**分类号** O562.5

## 1 引 言

溅射是一种在荷能粒子轰击下对材料表面原子尺度的侵蚀, 是薄膜技术、材料表面分析及高剂量离子束材料改性等应用领域必须关注的课题<sup>[1,2]</sup>. 影响多元材料(有机材料、无机材料及多元合金等)溅射的机制是复杂的, 有物理溅射、也有化学溅射、有单纯的原子出射、也有团簇(Cluster)出射等. 众所周知, 同位素混合物(自然界的铜就是<sup>63</sup>Cu 与<sup>65</sup>Cu 组成的混合物)的溅射, 是多元材料溅射中最简单的, 因为仅需考虑各同位素之间的质量差异. 然而, 这样一个最基本的质量效应, 至今仍困惑着表面物理学界<sup>[3~12]</sup>, 并称之为“同位素迷惑”(Isotopic puzzle)<sup>[3]</sup>. 同时, 由此引发了两种观点的激烈争论<sup>[5,6]</sup>.

## 2 同位素富集度与基本理论公式

除了上面所述, 同位素溅射其自身的应用前景也很广泛<sup>[7]</sup>, 在此仅举一例. 在太阳系中, 存在大量由太阳喷射出的荷能粒子流, 统称为太阳风(Solar wind); 太阳风与太阳系物体(行星表面、大气层、宇宙飞船等)相互作用, 是美国宇航局的基本研究课题. 月球样品的同位素成分异常(Anomalies)的发现, 使同

位素溅射研究项目一直得到美国宇航局资助<sup>[12]</sup>.

为了便于讨论, 仅考虑二元同位素混合物的溅射. 其研究的物理量是同位素富集度  $\delta(L/H)$ , 也称为同位素分馏因子. 其定义为

$$\delta(L/H) = [(Y_L/Y_H)/(C_L/C_H) - 1] \times 1000(\%), \quad (1)$$

式中,  $Y_L$  和  $Y_H$  分别是轻、重同位素的溅射产额(单位是 atoms/ion),  $C_L$  和  $C_H$  分别是轻、重同位素的基体成分(单位是原子百分比 at. %).  $Y_L, Y_H, C_L$  和  $C_H$  都可测量得到.

根据线性碰撞级联(Linear collision cascade)理论, Sigmund 建立了计算零剂量[又称为低剂量( $10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>)]极限, 在低剂量极限时, 靶的成分几乎没有任何变化. 这种溅射态称为溅射初始态<sup>[11]</sup>时, 同位素富集度  $\delta(L/H)$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$\delta(L/H) = [(M_H/M_L)^{2m} - 1] \times 1000(\%), \quad 0 < m < 1 \quad (2)$$

式中,  $M_L$  和  $M_H$  分别是轻、重同位素的原子质量.  $m$  是与原子相互作用势相对应的参数, 对不同的相互作用势,  $m$  的取值不同<sup>[3]</sup>. 这一描述同位素富集度的公式是简单、明确、实用的, 它反映了影响同位素溅射的机制本质, 即与质量有关.

\* 国家自然科学基金资助课题, 课题编号 19675061.  
1997 - 10 - 23 收稿.

### 3 零剂量时同位素富集度与出射角的相关性

(2)式表明,零剂量时,同位素富集度与出射极角无关.然而,Shapiro 和 Tombrello<sup>[8,9]</sup>用 MD 模拟(Molecular Dynamics Simulation)计算了零剂量时的  $\delta$  值,发现  $\delta$  值与出射极角有关.其理由是,MD 模拟首次揭示了碰撞级联的各向异性很明显,而 Sigmund 的理论假定碰撞级联是各向同性的<sup>[7]</sup>.另外,模拟  $\delta$  值比理论  $\delta$  值大得多.

谁是谁非,应由事实证明.以往测量技术所限,实验只能在高剂量(随入射剂量增大,表面成分不断变化,但是达到某一剂量以上时,表面成分不再变化(粒子守恒要求),大于此剂量便称为高剂量.通常高剂量为  $10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>.这种溅射态称为溅射稳定态<sup>[13,17]</sup>)下进行.1988 年以后,由于测量技术的改进和提高,在  $10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 这样的低剂量时,实验  $\delta$  值已有很高的精确度.1990 年,一个当时称为零剂量( $<10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>)的实验结果问世(见文献<sup>[11]</sup>图 4).Gnaser 等人<sup>[11]</sup>的测量结果表明:(1)在  $0^\circ \sim 60^\circ$  间, $\delta(^{70}\text{Ge}/^{75}\text{Ge})$  与出射角无关;在  $>60^\circ$  时, $\delta$  值逐渐减小.(2)在  $0^\circ$  时,实验  $\delta$  值为 52% (见文献<sup>[11]</sup>表 1).实验结果(1)的  $\delta$  值与出射角( $0^\circ \sim 60^\circ$ )无关的结果,似乎支持了 Sigmund 理论的观点. Shapiro 和 Tombrell 的 MD 模拟曾报道<sup>[8]</sup>,两个同位素相对质量差为 10%,模拟  $\delta$  值为 56%.对  $^{70}\text{Ge}$  和  $^{76}\text{Ge}$ ,相对质量差为 8.6%,实验  $\delta$  值为 52%,而理论  $\delta$  值为 18% ( $m$  值为 0.11<sup>[3]</sup>).三者相比较,实验值与 MD 模拟值接近,而比理论值大得多.因此,与实验结果(1)支持理论观点相对立,实验结果(2)又似乎支持了 MD 模拟.在理论与模拟对立的情况下,Gnaser 等人的实验引起人们更深的困惑.

### 4 同位素溅射角效应是一次溅射效应还是二次溅射效应?

文献<sup>[7]</sup>给出了一次溅射效应和二次溅射效应的定义.二次溅射效应是指轰击诱发表面成分变化对溅射的影响<sup>[17,18]</sup>.一次溅射效应又叫非化学计量溅射效应.为便于理解,现做一些解释.假定入射剂量为零剂量(此时,表面成分等于基体成分),对二元材料(它的基体成分分别为  $C_L$  和  $C_H$ )来说,轻、重两种元素的溅射产额比  $Y_L/Y_H$  有如下关系,

$$Y_L/Y_H = C_L/C_H, \quad (3a)$$

$$Y_L/Y_H \neq C_L/C_H. \quad (3b)$$

(3a)式化学计量溅射,(3b)式表示非化学计量溅射.(3b)式指一次溅射效应,也称择优溅射.

同位素溅射角效应是一次(溅射)效应,还是二次(溅射)效应,这是争论的焦点. Sigmund<sup>[7]</sup>认为,角效应是二次效应,即是由表面成分的变化引起.当高剂量( $10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>)时,靶表面明显地存在一个由轰击诱发的成分梯度,由此产生了角效应. Shapiro 和 Tombrello<sup>[9]</sup>认为,角效应是一次效应. MD 模拟计算表明,在零剂量时,轻原子在垂直方向择优出射,原因是平均说来轻原子比重原子带有更多朝靶表面方向的动量,即碰撞级联的各向异性是明显的.仔细地分析了 Gnaser 等人<sup>[11]</sup>的实验之后,作者认为,当时实验剂量( $<1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>)虽然是低剂量,但决不是零剂量.在这个剂量时,一次效应起作用的同时,二次效应也在起作用.文献<sup>[11]</sup>的实验结果是一次效应和二次效应的联合效应.根据这个观点,本小组进行了 MC (Monte Carlo)模拟计算<sup>[16,17]</sup>,并发现了  $^{10}\text{B}$ - $^{11}\text{B}$  溅射在零剂量时,轻原子( $^{10}\text{B}$ )在垂直方向择优出射,在  $1.4 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 时, $\delta(^{10}\text{B}/^{11}\text{B})$  似乎与出射角无关.本工作可能给实验学家以某种启示<sup>[17]</sup>,即为揭示同位素溅射角效应的本质,提高测量精度,使实验中的低剂量更接近于零剂量是必要的.

### 5 一个零剂量到高剂量的角效应实验

1993 年,Weathers 等人<sup>[12]</sup>报道了  $^{92}\text{Mo}$ -

$^{100}\text{Mo}$  溅射角效应的实验结果. 他们的实验数据是丰富的(表 1), 从零剂量范围到高剂量范围都有. 然而, 他们过分强调了一次效应对角效应的作用, 完全忽略了二次效应的作用. 他们不能对全部实验数据进行合理解释, 只用零剂量时的实验数据与理论、模拟及以往的实验数据进行比较解释.

这个实验受到 Sigmund 的严厉批评<sup>[5]</sup>, 甚至怀疑实验有问题. 反驳的观点<sup>[6]</sup>也是鲜明的, 坚持了零剂量时, 实验  $\delta$  值(对于 5 keV  $\text{Xe}^+$  入射,  $\delta(0^\circ) = 52.7\%$ )与出射角有关, 而且比理论  $\delta$  值(19%)大得多. 但是也承认实验结果可能受到靶表面形貌的影响.

作者认为, Weathers 等人的实验技术先

表 1 对于不同实验和模拟条件, 同位素富集度  $\delta$  值与剂量(或剂量范围)的关系

炮 弹	同位素对	剂量或剂量范围 ( $10^{15}$ ions/cm $^2$ )	$\delta(15^\circ$ 或 $17^\circ)$ (%)	$\delta(15^\circ$ 或 $17^\circ) - \delta(74^\circ$ 或 $75^\circ)$ (%)	实验或模拟
2 keV Xe	$^{63}\text{Cu}/^{65}\text{Cu}$	0.0		$27.3 \pm 3.5$	模拟 <sup>[18]</sup>
		0.5		$14.5 \pm 4.2$	
		1.6		$8.1 \pm 4.1$ (极小)	
		2.5		$18.6 \pm 4.1$	
		4.5		$24.7 \pm 3.9$	
		10.4		$30.6 \pm 3.8$	
5 keV $\text{Xe}^+$	$^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo}$	0~0.30	$52.7 \pm 5.3$	$30.5 \pm 8.4$	实验 <sup>[12]</sup>
		0~0.61	$45.8 \pm 4.1$		
		0~1.0±0.3	$35.5 \pm 4.3$	$24.8 \pm 6.8$	
		0.61~1.82	$41.0 \pm 4.2$	$12.1 \pm 10.6$ (极小)	
		1.82~4.29	$36.1 \pm 3.8$	$19.8 \pm 5.7$	
		4.29~7.93	$18.6 \pm 4.5$	$25.8 \pm 5.8$	
		7.93~20.05	$0.0 \pm 4.7$	$25.1 \pm 5.6$	
5 keV $\text{Ar}^+$	$^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo}$	0~1.22	$38.1 \pm 6.4$	$17.6 \pm 10.3$	实验 <sup>[12]</sup>
		2.43~4.86	$24.6 \pm 3.4$	$1.5 \pm 5.6$ (极小)	
		4.86~8.50	$12.0 \pm 3.3$		
		8.50~20.63	$3.8 \pm 2.7$	$14.2 \pm 4.1$	
10 keV $\text{Xe}^+$	$^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo}$	0~0.61	$29.1 \pm 5.1$	$12.3 \pm 10.0$	实验 <sup>[12]</sup>
		0.61~1.82	$32.3 \pm 3.4$		
		1.82~3.66	$28.5 \pm 3.5$		
		3.66~9.74	$18.1 \pm 2.5$	$24.6 \pm 4.1$	
10 keV $\text{Ar}^+$	$^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo}$	0~1.21	$30.3 \pm 8.2$	$-8.3 \pm 11.2$	实验 <sup>[12]</sup>
		1.21~3.65	$31.0 \pm 3.5$		
		3.65~7.31	$14.7 \pm 3.1$		
		7.31~19.45	$3.9 \pm 3.0$	$9.0 \pm 4.2$	
5 keV Ar	$^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo}$	0~1.22	$32.6 \pm 3.9$	$14.3 \pm 4.2$	模拟 <sup>[22]</sup>
		2.43~4.86	$21.4 \pm 3.6$	$4.5 \pm 4.1$ (极小)	
		4.86~8.50	$11.5 \pm 3.4$	$12.7 \pm 4.0$	
		8.50~20.63	$5.3 \pm 3.2$	$20.8 \pm 3.6$	
5 keV Xe	$^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo}$	0.0	38.3	31.2	模拟 <sup>[21]</sup>

进,实验数据是精确的<sup>[21]</sup>.影响同位素溅射角效应的仍然是基本溅射机制——一次(溅射)效应和二次(溅射)效应.这一看法暂时还无法解释实验现象,因此用表面形貌来解释是不适当的.仔细分析了 Weather 等人的实验<sup>[12]</sup>之后,作者认为<sup>[18]</sup>,他们的实验结果完全证实了作者 1991 年的预言<sup>[17]</sup>.

### 6 一次(溅射)效应和二次(溅射)效应如何联合影响同位素溅射角效应

1991 年,MC 模拟表明<sup>[17,18]</sup>,对于<sup>10</sup>B-<sup>11</sup>B 溅射,富集度差值  $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$  与离子入射剂量有如下关系:在零剂量和高剂量时,其差值  $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$  为正(表明轻原子在垂

直方向择优出射),在零剂量和高剂量之间有一个低剂量,在此低剂量时, $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$  有一个极小值(图 1).

1993 年,Weathers 等人的<sup>92</sup>Mo-<sup>100</sup>Mo 溅射实验<sup>[12]</sup>,也同样展现出这种现象,特别是 5 keV Xe<sup>+</sup> 和 5 keV Ar<sup>+</sup> 入射时(表 1).对 10 keV Xe<sup>+</sup> 入射,实验给出零剂量和高剂量时, $\delta(17^\circ) - \delta(74^\circ)$  为正,这与预言的一致(零剂量和高剂量之间没有实验数据).作者曾讨论过<sup>[18]</sup>,实验中,只要零剂量选择适当,就能看到预言的现象,如果选择不适当,只能看到随着剂量增大, $\delta(17^\circ) - \delta(74^\circ)$  单向增大,而不能看到极小现象的出现.对于 10 keV Ar<sup>+</sup> 入射,实验结果与讨论的一致(表 1).

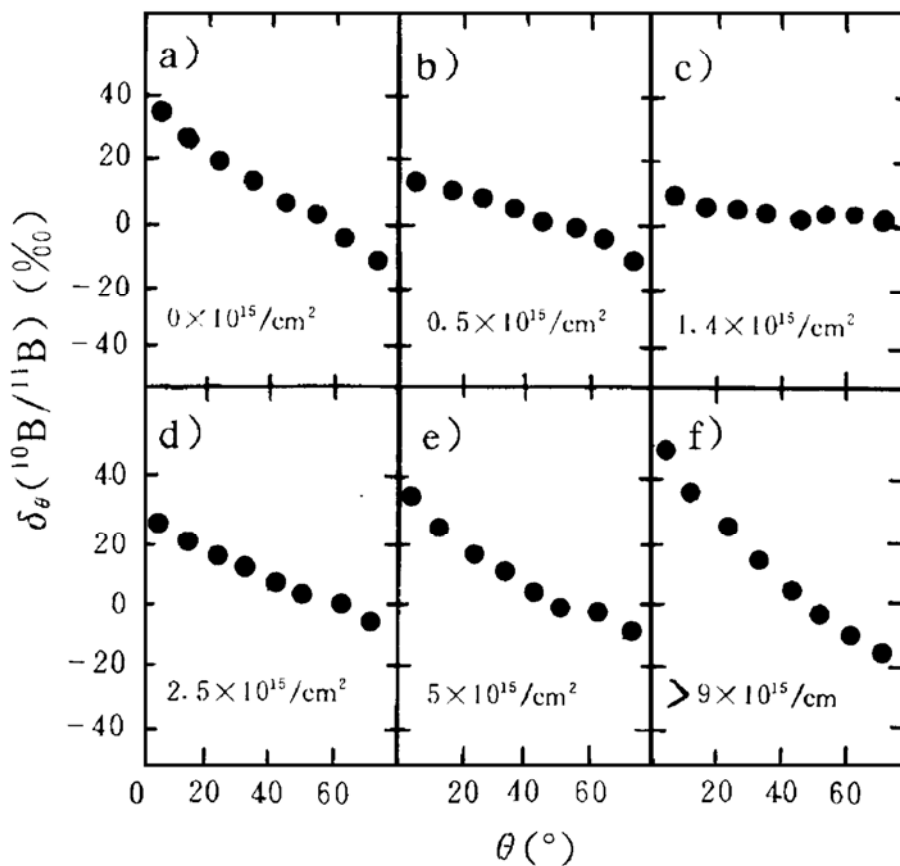


图 1 在 1 keV Kr-<sup>10</sup>B-<sup>11</sup>B 下,对于不同的剂量, $\delta$  值与出射极角  $\theta$  的关系<sup>[17]</sup>

总之,对于同位素(<sup>63</sup>Cu-<sup>65</sup>Cu)溅射,作者认为<sup>[18]</sup>,在零剂量时, $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$  为正,因为平均而言轻原子比重原子带有更多朝靶表面方向的动量<sup>[8]</sup>,此时角效应完全是一次(溅射)效应,也就是说完全由动量不对称性(或

碰撞级联各向异性)决定.随着入射离子剂量增大,角效应是一次(溅射)和二次(溅射)的联合效应.在低剂量时, $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$  逐渐减小,因为轻原子的表面成分梯度是正的,即二次效应减弱了一次效应对角效应的影响.

在某一低剂量( $1.6 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>)、 $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$ 极小, 因为此时轻原子表面成分梯度极大, 即二次效应最强有力地减弱一次效应对角效应的影响. 如果此时  $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$  的极小充分地小, 那么  $\delta$  值似乎可被认为与出射角无关. 在高剂量时,  $\delta(15^\circ) - \delta(75^\circ)$  也是正的, 因为轻原子表面成分梯度是负的, 也就是说二次效应增强了一次效应对角效应的影响(表 1 和表 2).

表 2 对于 2 keV Xe-<sup>63</sup>Cu-<sup>65</sup>Cu、<sup>63</sup>Cu 的表面成分梯度( $C_1-C_2$ )与剂量的关系, 这里  $C_1$  和  $C_2$  分别表示第一和第二表面原子层的成分<sup>[17,18]</sup>

剂量/ $10^{15}$ ions · cm <sup>-2</sup>	( $C_1-C_2$ )(at. %)
0.0	0.0
0.5	+2.3±0.5
1.6	+3.8±0.5(最大)
2.5	+1.9±0.5
4.5	+0.4±0.4
10.4	-1.2±0.4

为了与 Weathers 等人的实验结果进行定量比较, 本小组模拟计算了  $\delta(^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo})$  与入射剂量的关系. 结果表明, 本小组的 MC 模拟  $\delta$  值<sup>[22]</sup>与 Weathers 等人的实验  $\delta$  值<sup>[12]</sup>, 在统计误差范围内基本符合(表 1).

表 3 在 5 keV Xe 和 Ar 轰击下, 通过标志平面 1 和 2 的动量通量比值,  $R_s(^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo})$ (朝靶表面方向)和  $R_b(^{92}\text{Mo}/^{100}\text{Mo})$ (朝基体方向)

炮 弹	标志平面 1		标志平面 2		文 献
	离靶表面 0.25 nm		离靶表面 1 nm		
	$R_s$	$R_b$	$R_s$	$R_b$	
5 keV Xe	1.27	0.83	1.15	0.89	[21]
5 keV Ar	1.22	0.86	1.12	0.91	[22]

## 7 动量不对称性

Shapiro 和 Tombrello 认为, 在同位素溅射中, 动量不对称性起了主要作用. 他们的 MD 模拟表明(所考察的靶是单晶的, 4 个原子层厚): (1) 重原子比轻原子的平均动量大; (2) 平均来说, 轻原子比重原子带有较大的朝靶表面方向的动量<sup>[8,9]</sup>. 根据结果(2), 很容易理解为什么在零剂量时, 轻原子在垂直方向择优出射的问题.

1993 年, Sigmund 等人<sup>[3,4]</sup>在理论上也考虑了动量不对称性, 并得到(所考察的靶是无定形的和无限的)在全空间重原子与轻原子总动量的比值为  $(M_H/M_L)^{3/2}$ . 这个理论关系与 MD 模拟的结论(1)定性上一致. 由于所考察的条件不同(主要指靶), 因此理论与 MD 模拟不能进行严格地定量比较. MD 模拟表明(见文献[8]中表 5), 相对质量差为 22%, 其重原子与轻原子平均动量比值为 2.4. 这一 MD 模拟值比理论值明显有很大的偏离, 因而为受到 Sigmund 的激烈评论<sup>[3,4]</sup>.

本小组认为, MD 模拟中选择薄靶是合理的, 因为  $\delta$  值主要取决于靶表面的动量, 而不是全空间的总动量. 理由是, 溅射原子绝大部分来自于靶表面第 1 个和第 2 个原子层. 为了验证 MC 模拟结论的正确性, 也考虑大多数实验中的靶条件, 所考察的靶是无定形

的和半无限的固体靶<sup>[21]</sup>. 在离靶表面 0.25 nm 处(1 个原子层)和 1 nm 处(4 个原子层),

分别设置了两个假想的标志平面(Marker plane)(见文献[21]中图 1). MC 模拟计算了

分别通过这两个标志平面的轻原子与重原子动量通量的比值  $R_s$  (朝靶表面方向) 和  $R_b$  (朝基体方向). 对于不同的表面深度,  $R_s > 1$  (表 3), 本小组的这个结果支持了 Shapiro 和 Tombrello 的结论(2); 也就是说, 因为轻原子比重原子带有较大的朝靶表面方向的动量 (或动量通量), 所以零剂量时,  $\delta(17^\circ)$  和其差值  $\delta(17^\circ) - \delta(74^\circ)$  不仅为正, 而且较大<sup>[21]</sup>. 表 3 还表明, 随着靶表面深度减小,  $R_s$  增加而  $R_b$  减小. 也就是说, 随着靶表面深度减小, 朝靶表面方向, 轻原子的动量通量比重原子的动量通量越来越大, 而朝基体方向, 轻原子的动量通量比重原子的动量通量越来越小. 这两种动量通量随靶表面深度的明显变化, 促使轻原子在表面富集, 从而在低剂量时, 得到一个明显的正轻原子成分梯度.

## 8 展 望

近年来经各方的努力, 对溅射的质量效应 (或同位素效应) 的认识有所深入, 有些方面已达到共识. 例如, 对于典型的  $^{92}\text{Mo}$ - $^{100}\text{Mo}$  的零剂量溅射, 各方得到  $\delta$  值与出射角的关系在定量上基本一致 (见文献[15]中图 15). 然而, Shapiro 和 Tombrello 关于“零剂量时  $\delta$  值主要取决于动量不对称性”的观点, 仍然受到 Sigmund 等人的挑战, 他们发现 (用 MD 模拟)<sup>[13~15]</sup>, 零剂量时的  $\delta$  值与直接和入射离子碰撞的原子 (Primary Knockon Atoms) 的贡献密切相关. 坚持“动量不对称性”观点的人, 必须拿出更有力的证据. 当然为了使认识深化, 提供新的精确的实验数据是必不可少的.

同位素之间的相对质量差是小的, 这就使对同位素溅射实验有很高的技术要求. 能做此类实验的都是些技术先进的国家, 例如美国和德国等. 因此, 开展同位素测射实验, 在某种意义上, 能促进我国一些相关技术, 如超高真空技术、离子源技术、表面分析技术及同位素分离技术……等的发展.

质量与电荷是自然界中最基本的物理

量. 不仅在表面物理中, 而且在核物理、基本粒子物理及宇宙物理等中, 都正在研究由于质量变化所引起的种种影响. 在表面物理中, 质量效应是溅射领域一个经久不衰、不断出新意的研究课题.

## 参 考 文 献

- 1 Sigmund P. Mechanisms and Theory of Physical Sputtering by Particle Impact. Nucl Instr and Meth, 1987, B27:1~17
- 2 Kelly R. The Role of Segregation (I). In Materials Modification by High-fluence Ion Beams (Edited by Kelly R et al. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands), 1989, 303~335
- 3 Sigmund P, Sckerl M W. Momentum Asymmetry and the Isotope Puzzle in Sputtering by Ion Bombardment. Nucl Instr and Meth, 1993, B82:242~254
- 4 Sigmund P, Lam N Q. The Isotopic Sputtering by Ion Bombardment. In K. Dan Vidensk Selsk Mat Fys Medd, 1993, 43:255~285
- 5 Sigmund P. Letter to the Editor-note on Isotope Sputtering. Nucl Instr and Meth, 1993, B82:192~193
- 6 Weathers D L, Tombrello T A, Shapiro M H. Letter to the Editor-reply to “Note on Isotope Sputtering”. Nucl Instr and Meth, 1993, B82:194~195
- 7 Sigmund P. Preferential Sputtering from Isotopic Mixtures and Alloys of Neighbor Elements. Nucl Instr and Meth, 1987, B18:375~387
- 8 Shapiro M H, Haff P K, Tombrello T A. Simulation of Isotopic Mass Effects in Sputtering. Nucl Instr and Meth, 1985, B12:137~158
- 9 Shapiro M H, Tombrello T A, Harrison D E Jr. Simulation of Isotopic Mass Effects in Sputtering (II). Nucl Instr and Meth, 1988, B30:152~158
- 10 Gnaser H, Oechsner H, Huthcheon I D. Significance of Isotope for Secondary-ion Emission Models. Phys Rev, 1988, B38:11112~11117
- 11 Gnaser H, Oechsner H. Isotopic Mass Effects in Sputtering: Dependence on Fluence and Emission Angle. Nucl Instr and Meth, 1990, B48:544~548
- 12 Weathers D L, Tombrello T A, Gnaser H. Isotopic Fractionation in the Sputtering of  $^{92}\text{Mo}$ - $^{100}\text{Mo}$  Targets. Nucl Instr and Meth, 1993, B73:135~150
- 13 Eckstein W. Comment on “Isotopic Fractionation in the Sputtering of  $^{92}\text{Mo}$ - $^{100}\text{Mo}$  Targets by Weathers D L et

- al". Nucl Instr and Meth, 1993, B83:329~333
- 14 Shulga V I, Sigmund P. Simulation of Energy-dependent Isotope Sputtering. Nucl Instr and Meth, 1995, B103:383~386
- 15 Shulga V I, Sigmund P. Analysis of the Primary Process Sputtering. Nucl Instr and Meth, 1996, B119:359~374
- 16 Zheng L P, Li R S, Li M Y. Boron Isotope Fractionation during Prolonged Ion Bombardment. Chinese Phys Lett, 1991, 8:325~327
- 17 Zheng L P, Li R S, Li M Y. Correlation between Isotope Fractionation and Surface Composition Profile during Prolonged Bombardment. Nucl Instr and Meth, 1991, B62:61~64
- 18 Zheng L P, Li R S, Li D X. Simulation of Isotope Effects in the Sputtering of  $^{63}\text{Cu}\sim^{65}\text{Cu}$ . Vacuum, 1995, 46:277~280
- 19 Zheng L P, Cui F Z. Isotope Fractionation in the Sputtering of  $^{63}\text{Cu}\sim^{65}\text{Cu}$ . Chinese Phys Lett, 1995, 12:431~434
- 20 Zheng L P, Li R S, Li R Y. Simulation of Isotopic Angular Effects under Ion Bombardment of a  $^{92}\text{Mo}\sim^{100}\text{Mo}$  Target. J Mater Sci Technol, 1997, 13:65~68
- 21 Zheng L P, Li R S, Li M Y. Simulation of Momentum Flux Ratios in the Cascade in the Sputtering of  $^{92}\text{Mo}\sim^{100}\text{Mo}$ . Nucl Instr and Meth, 1995, B100:490~492
- 22 Zheng L P, Li M Y. Simulation of the Isotopic Angular Pattern during the  $^{92}\text{Mo}\sim^{100}\text{Mo}$  Sputtering. Nucl Instr and Meth, 1996, B114:28~33

## Isotope Puzzle in Sputtering

ZHENG Liping

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Mechanisms affecting multicomponent material sputtering are complex. Isotope sputtering is the simplest in the multicomponent materials sputtering. Although only mass effect plays a dominant role in the isotope sputtering, there is still an isotope puzzle in sputtering by ion bombardment. The major arguments are as follows: (1) At the zero fluence, is the isotope enrichment ejection-angle-independent or ejection-angle-dependent? (2) Is the isotope angular effect the primary or the secondary sputter effect? (3) How to understand the action of momentum asymmetry in collision cascade on the isotope sputtering?

**Key Words** isotopic enrichment primary sputter effect secondary sputter effect