

利用溅射原子角分布规律改进平行板静电场法

谢国锋

(湘潭大学材料与光电物理学院,湘潭 411105)
(2007 年 3 月 23 日收到,2007 年 4 月 16 日收到修改稿)

用 Trim 程序计算溅射原子的角分布规律,发现溅射原子出射角服从过余弦分布,利用这一规律,改进了收集方法,使得离子收集效率大大提高.

关键词:AVLIS,离子引出,溅射

PACC:5265,5235

1. 引言

在原子蒸气激光同位素分离(AVLIS)工程中,目标同位素被激光选择性电离后,在电磁场的作用下向收集板运动.激光等离子体离子引出是原子蒸气激光同位素分离系统的重要一环,快速低耗高收集率地将激光选择性电离产生的目标同位素离子引出收集是其核心问题^[1-3].常见的引出收集方法是静电场法和 RF 共振法.电子平衡流体模型, PIC-MCC 粒子模拟方法,以及结合电子平衡和粒子模拟的杂化方法是等离子体数值模拟的常用方法^[4-7].文献 8—12 用这些方法对各种收集引出方法进行了数值模拟,得到了引出时间、碰撞损失率的规律.文献 13,14 研究了平行板静电场法和 RF 共振法的收集效率.平行板静电场法具有结构简单易于实施的优点,但是为了降低碰撞损失而增加引出电压,其溅射损失大大增加,所以它的收集效率很低.文献 [13] 虽然提出了一种改进方法,但是要改变电源,不易实施. RF 共振法的碰撞损失和溅射损失都较低,收集率较高,但是高频率的 RF 共振法对电源的要求很高,不如平行板静电场法易于实现.本文计算溅射原子出射角的分布规律,并且利用这一规律,简单地改变收集板的几何形状,即可大大提高平行板静电场法的收集效率,且易于实施.

2. 溅射原子角分布

令 Y 轴和 Z 轴构成靶表面, X 轴表示靶的法线, θ 表示溅射原子的出射角(即溅射原子的速度矢

量和 X 轴的夹角), ϕ 表示方位角.本文利用 Trim 程序进行计算,计算结果对 ϕ 和 θ 构成的空间给出了溅射原子的分布.在垂直入射条件下,溅射原子的分布对于方位角 ϕ 是各向同性的,如图 1 所示(入射离子为 Gd^+ , 能量 3 keV, Cu 靶).那么溅射产额的角分布就只与 θ 相关.定义 $Y(\theta)$ 为溅射产额的角分布,

$$\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} Y(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi = Y. \quad (1)$$

图 2 给出了 $Y(\theta)$ 的分布,图中给出的是 $Y(\theta)$ 的相对值.

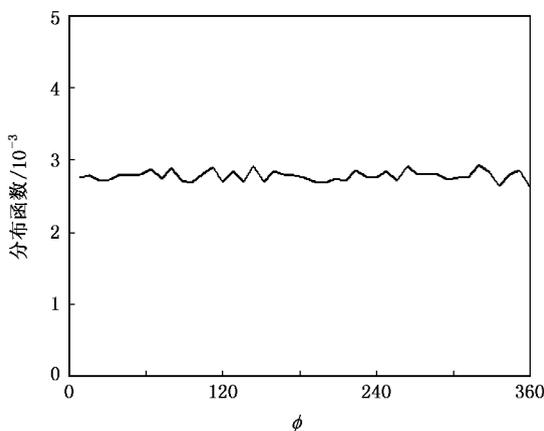


图 1 溅射原子随方位角的分布

Sigmund 根据线形级联理论,提出溅射原子角分布呈余弦分布,从模拟的结果看,实际上是过余弦分布,如(2)式.这种过余弦分布曲线的形状与离子的入射角、离子和靶原子的质量比、靶表面形貌变化有关.图 3 给出了当入射角分别是 0° , 30° 和 70° 情况下(3 keV Gd^+ 入射到 Gd 靶上),相对产额 $Y(\theta)$ 的分布,

$$Y(\theta) = C \times \cos(\theta)^n \quad (2)$$

对于倾斜入射, 溅射原子的分布不但同 θ 有关, 而且对于方位角 ϕ 也呈现各向异性, 如图 4 所示 (模拟条件同图 3) 随着入射角的增大, 溅射原子的分布同方位角呈正弦关系, 且入射角越大, 各向异性越明显.

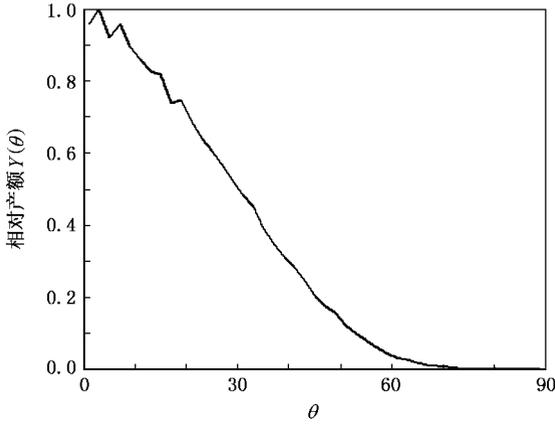


图 2 相对产额 $Y(\theta)$ 随出射角的分布

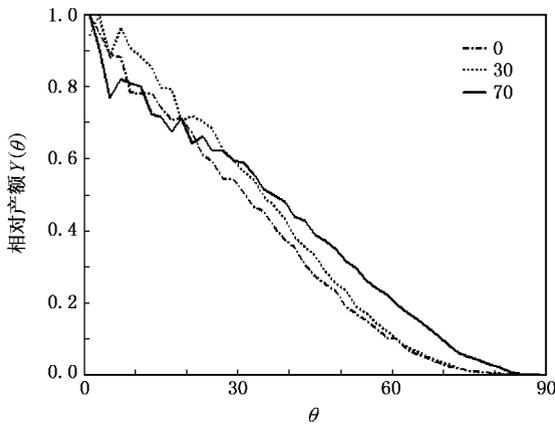


图 3 不同入射角的相对产额 $Y(\theta)$

(2) 式可以改写为

$$\ln Y(\theta) = \ln C + n \ln \cos(\theta), \quad (3)$$

所以系数 C 和 n 可以通过线性回归的方法获得. 例如 5 keV 的 Gd^+ 离子垂直入射 Gd 靶, $\ln Y(\theta)$ 和 $\ln \cos(\theta)$ 的关系如图 5 所示. 根据回归的结果可得 $C = 4.69$, $n = 3.18$. 表 1 分别给出了 1 keV, 5 keV 和 10 keV 的 Gd^+ 离子垂直入射 Gd 靶, 系数 C 和 n 的值, 表 2 给出了 5 keV 的 Gd^+ 离子入射 Gd 靶, 入射角分别为 0° 到 80° , 系数 C 和 n 的值.

从表 1 可以看出 n 的数值随入射离子能量的增加而降低; 从表 2 可以看出当入射离子的入射角

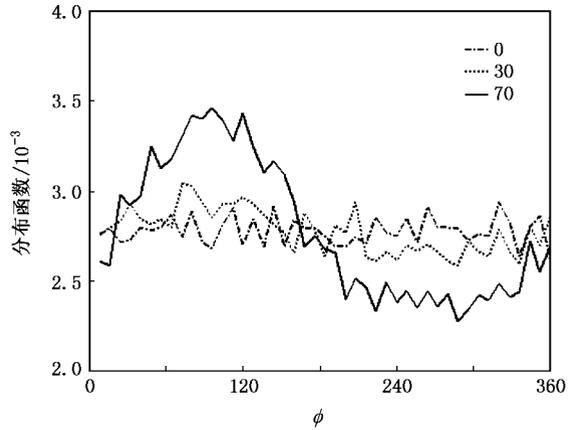


图 4 不同入射角溅射原子随方位角的分布

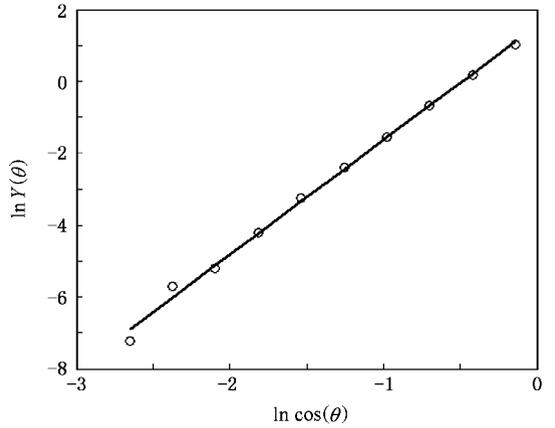


图 5 $\ln Y(\theta)$ 和 $\ln \cos(\theta)$ 的关系

小于 40° 时, n 的变化不大, 在 3.10 附近, 当入射角超过 40° , n 的数值随入射角增大而减小.

表 1 不同能量的离子垂直入射 Gd 靶系数 C 和 n 值

入射离子能量/keV	C	n	相关系数 R^2
1	6.06	3.84	0.995
5	4.69	3.18	0.997
10	3.92	2.84	0.998

表 2 不同角度的离子入射 Gd 靶系数 C 和 n 值

入射角($^\circ$)	C	n	相关系数 R^2
0	4.69	3.18	0.997
10	4.45	3.24	0.994
20	4.30	3.09	0.987
30	4.45	3.12	0.999
40	5.16	3.18	0.996
50	4.04	2.70	0.999
60	3.60	2.41	0.987
70	3.66	2.22	0.999
80	3.30	1.90	0.987

总之,从模拟计算的结果可以看出,溅射原子的过余弦分布是很明显的,或者说出射方向靠近靶表面法线较小的范围溅射出来的原子占据了很大的份额.由于模拟中把靶表面理想化为平面,实际上靶表面是凹凸不平的,由于阴影效应,小角度更为占优,或者说 n 的值比模拟值更大.假设系数 n 为 3,通过简单的积分计算可以得出,出射角从 0° 到 30° 的溅射原子占有所有溅射原子的比例高达 69%.

3. 改进的收集方法

利用溅射原子的过余弦分布可以改进收集器的设计,使得平行板静电场法可以在很高的引出电压的情况下,仍然达到很高的收集率.收集原理如图 6 所示,目标同位素离子从多孔的阴极引出,进入收集弯管,到达离子入射区,由于溅射原子的出射角是小角度占优的,所以绝大多数溅射原子沉积在原子收集区,而很少有原子沿原路返回,逃逸出收集弯管.合理地设计收集弯管的弯曲角度和长度等形状参数,可以使收集率很高.

另外通过模拟计算得到了溅射原子的能量分

布.入射离子能量为几个 keV 情况下,溅射原子的能量大多分布在几十 eV,那么利用图 6 所示的收集原理,溅射原子在收集区产生的二次溅射是很少的,目标同位素大量富集在原子收集区.

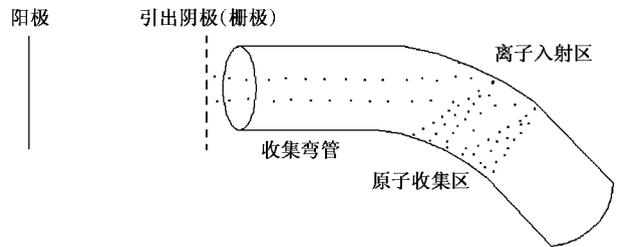


图 6 收集原理图

4. 结 论

本文应用 Trim 程序计算了不同能量、不同入射角度的离子产生的溅射原子出射角的分布规律,发现溅射原子出射角服从过余弦分布,即出射方向靠近靶表面法线较小的范围溅射出来的原子占据了很大的份额.利用这一规律,提出了一种简单有效的收集方法,用收集弯管替代平行板静电场法的平面收集板,使得收集率大大提高.

[1] Parvin P, Sajad B, Silakhori K, Hooshvar M, Zamanipour Z 2004 *Prog. Nucl. Ener.* **44** 331

[2] Suzuki M, Ezoubtchenko A, Akatsuka H, Matsuura H, Takagi R 2002 *Prog. Nucl. Ener.* **40** 561

[3] Song X P, Chen R, Bao C Y, Wang D W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4198 (in Chinese) [宋晓鹏、陈戎、包成玉、王德武 2005 物理学报 **54** 4198]

[4] Jian G D, Dong J Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1656 (in Chinese) [简广德、董家齐 2003 物理学报 **52** 1656]

[5] Wu Y Q, Han S S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 915 (in Chinese) [吴衍青、韩申生 2000 物理学报 **49** 915]

[6] Wang H Y, Huang Z Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 2560

[7] Shao F Q, Wang L, Yao X Z, Wu H M 1996 *Chin. Phys.* **5** 677

[8] Yan M, Ying C T, Wang D W, Chu X H 1996 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Tech.)*. **36** 5 (in Chinese) [严敏、应纯同、王德武、诸旭辉 1996 清华大学学报(自然科学版) **36** 5]

[9] Yan M, Ying C T, Wang D W, Chu X H 1998 *Chin. J. Nucl. Sci. Eng.* **18** 68 (in Chinese) [严敏、应纯同、王德武、诸旭辉 1998 核科学与工程 **18** 68]

[10] Xiong J G, Wang D W 1999 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Tech.)* **39** 48 (in Chinese) [熊家贵、王德武 1999 清华大学学报(自然科学版) **39** 48]

[11] Xiong J G, Wang D W 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2420 (in Chinese) [熊家贵、王德武 2000 物理学报 **49** 2420]

[12] Xiong J G, Wang D W 2000 *Atom. Ener. Sci. Technol.* **34** 307 (in Chinese) [熊家贵、王德武 2000 原子能科学与技术 **34** 307]

[13] Xie G F, Wang D W, Ying C T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1543 (in Chinese) [谢国锋、王德武、应纯同 2005 物理学报 **54** 1543]

[14] Xie G F, Wang D W, Ying C T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2147 (in Chinese) [谢国锋、王德武、应纯同 2005 物理学报 **54** 2147]

Improving parallel electrode method by sputtering atoms ' angle distribution rule

Xie Guo-Feng

(Faculty of Material and Photoelectronic Physics , Xiangtan University , Xiangtan 411105 , China)

(Received 23 March 2007 ; revised manuscript received 16 April 2007)

Abstract

In atomic vapor laser isotope separation (AVLIS) engineering , the parallel electrode method has the advantage of simple structure , but when the extraction voltage is high , the sputtering loss is very large and the collection ratio is very low . This paper calculates the angular distribution of sputtering atoms by Trim code . The results show that the angular distribution follows the cosine rule . The collection method is modified according to the rule , which makes the collection ratio very high .

Keywords : AVLIS , ion extraction , sputtering

PACC : 5265 , 5235