

Ar 离子轰击 Ag 靶的溅射角分布

潘浩昌 陶振兰 郑里平 曹德新 张衡山 张阿虎 周祖尧 周 伟

(中国科学院上海原子核研究所) (上海半导体器件研究所) (中国科学院上海冶金研究所)

本文描述了用溅射粒子捕集器和 Rutherford 背散射分析测定溅射粒子角分布的实验方法。给出了 100keV Ar⁺ 在入射角分别为 0°、30°、50° 和 80° 时轰击 Ag 靶的溅射角分布。角分布偏离余弦形状, 有前倾趋势。溅射产额随入射角增大而迅速增加。由 50keV Ar⁺ 垂直入射 Ag 的溅射角分布计算出的总溅射产额为 $16.8 \pm 2.4 \text{ atoms/Ar}^+$ 。实验结果与理论值进行了比较, 并作了定性分析。

关键词: 溅射 溅射角分布

一、引 言

溅射角分布和溅射率的研究不仅是检验各种溅射机制(或溅射模型)的重要手段, 而且也与许多溅射的应用问题相关。

有关溅射理论的基础由 Sigmund^[1] 在 1969 年提出(线性溅射理论), 根据这一理论得出的空间溅射角分布是余弦形状的对称分布。但近几年来由于实验研究的发展, 表明在轻离子溅射、低能溅射和重离子溅射等方面, 其溅射产额和角分布都与 Sigmund 理论有明显的系统偏离。虽然近几年来不同作者^[2,3] 从不同的假设出发也提出了一些理论模型, 但都有局限性。

由于溅射是原子碰撞的复杂过程, 溅射产额和角分布形状可以由于入射离子种类、能量、离子源强度和靶面情况等不同而不同。必须积累和收集各种溅射条件下的实验数据, 进行大量系统的深入研究, 才能得出一个综合的理论模型。

二、实 验

溅射角分布的测量采用捕集器法。设计了一种封闭式捕集器, 它由直径分别为 60mm 和 40mm 的两个同轴铜圆筒所组成, 内圆筒装着一个铜半圆柱体, 靶子装在铜半圆柱(利用它作靶子散热)侧平面的中心部分, 且靶面在这侧平面内。靶面和捕集器同轴转动可使入射角从 0° 到 90° 任意变化。内、外圆筒的半高处、靶子前向 180° 范围内, 各开有一条宽 4mm 的狭缝。内圆筒上下各有金属片覆盖, 这样内圆筒与靶子组成一个封闭式的法拉第筒。外圆筒加上负 130V 的抑制电压。

利用捕集膜收集被溅射的原子, 为了保证粘着系数为 1 以及避免电荷堆积, 捕集膜以涤纶薄膜作衬底, 蒸上一层厚度约为 2000nm 的高纯 Al (Al 的纯度为 99.999%)。捕集膜被贴在外圆筒的狭缝上(测量入射平面内的角分布)。靶子和收集器的示意图如图 1。

溅射实验在 200kV 离子注入机上进行, 溅射靶室内装有转盘, 一次可装 4 个样品和捕集器, 在不破坏真空(1.06mPa)的条件下, 可做不同能量、不同样品、不同入射角的实验。

入射离子 Ar⁺ 的束流用束流积分器测量, 束流积分器放在高电位的靶室盖上, 用于电池供电, 每次实验前后对束流积分器进行校刻。入射束流一般维持在 1 μ A 左右, 每次实验的剂量为 $8.9 \times 10^{17} \text{ Ar}^+/\text{cm}^2$ 。

在 200kV 高压倍加器上用 180keV He⁺ 离子对收集膜作 Rutherford 背散射分析。He⁺ 束流一般维持在 0.2nA 内, 积分束流为 0.1 μ C。

为了校正 He⁺ 束流的积分 Q 值, 用真空喷镀法在载玻片上蒸发一层厚度为 20nm 的银层, 分别用 Dektak 断面测厚仪、石英天平及背散射对同一银膜进行测厚。测得的结果是: 测厚仪

测得 $91 \pm 2.5\text{nm}$, 石英天平测得 $18.7 \pm 1\text{nm}$, 背散射法测得 20.3nm , 在误差范围内可认为测得结果基本一致。在计算微分溅射产额时, 用测厚仪测得的结果对积分束流作校正。

由于溅射靶室的真空度较低, 靶面和捕集膜表面会有C原子沉积。靶面的C原子在溅射开始时首先被溅射掉, 因此捕集膜上也会收集到这些C原子。实验中, 在捕集膜的背散射谱中没有观察到C峰, 说明C原子数量不多。即使C原子数量较大, 在背散射谱中C峰位置也远离Ag峰, 对Ag的溅射角分布不会有什么影响。

三、结 果

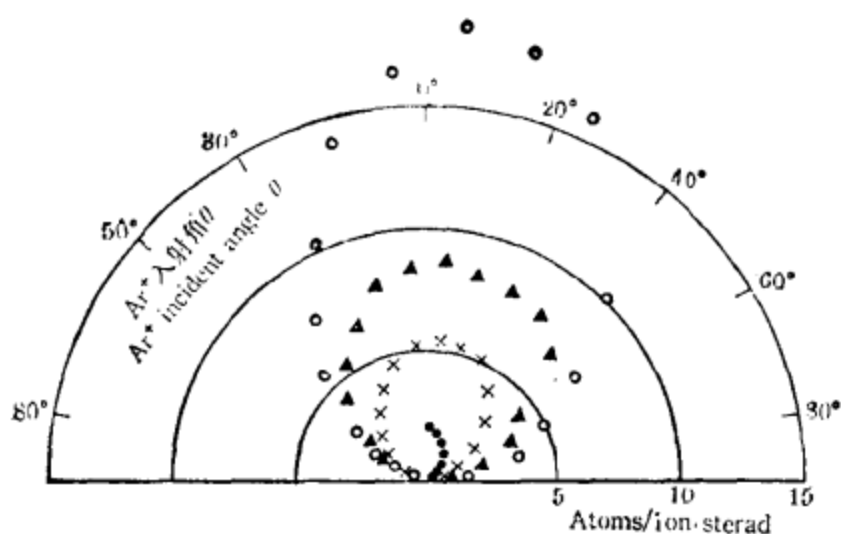


图2 100keVAr⁺离子轰击Ag靶的实验角分布

● $\theta=0^\circ$ × $\theta=30^\circ$ △ $\theta=50^\circ$ ○ $\theta=80^\circ$

Fig. 2 Differential sputtering yields of silver in the plane of incidence as a function of angle of incidence
The silver target is bombarded by 100 keV Ar⁺ at incident angle θ

众所周知, Sigmund的线性级联理论中假定了反冲原子的速度分布是各向同性的。由于Sigmund考虑的入射离子能量范围较高, 反冲原子在被溅射出表面之前可以充分地多次碰撞, 因而其速度分布必然是各向同性的。Y. Yamamura认为, 在入射离子能量较低的状况下, 反

表 50keVAr⁺离子轰击Ag的总溅射产额

Table Total sputtering yield of Ag for 50keV Ar⁺ bombardment

本实验 This work	文献[1] Ref. [1]	文献[3] Ref. [3]
16.8 ± 2.4	12.3	12.0

射产额公式^[3]。在入射离子能量为100keV附近时, 阈能所造成的各向异性可以忽略。角分布

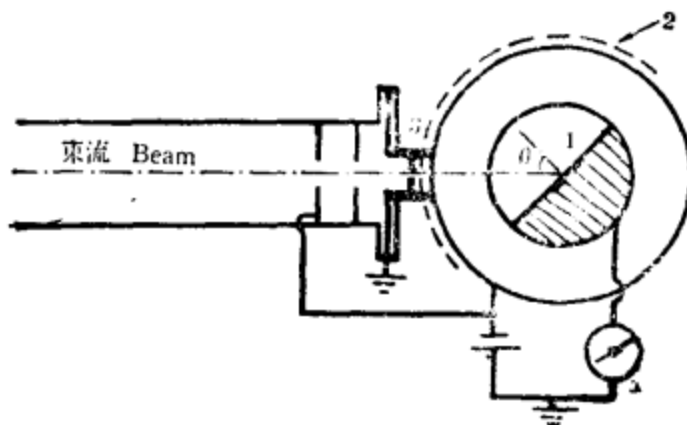


图1 溅射捕集器示意图

1. 靶 2. 收集级 3. 准直器

Fig. 1 Target and collector arrangement for sputtering

1. Target 2. Collector strip 3. Collimators

用100keV Ar⁺离子轰击Ag靶, 入射方向与靶面法向夹角分别为0°、30°、50°和80°。所得到的微分溅射产额随出射角的变化如图2所示。

积分垂直入射时的实验角分布可获得总溅射产额。实验结果与理论计算比较列于表中。

溅射产额的实验误差来自统计误差和角度误差(约1度)。

四、讨论与结论

冲原子为了保持具有足够能量被溅射出表面, 只能进行有限次数的碰撞。换句话说, 在丢失对入射离子速度方向“记忆”之前, 反冲原子被溅射出表面, 所以其反冲原子的速度分布是各向异性的。Y. Yamamura还借用了Thompson理论中的折射定律, 研究了内外表面反冲原子通量之间的关系从而得出溅

形状又恢复到 Sigmund 的余弦分布形状。因此,表中 Y_{sigmund} 和 Y_{yamamura} 的溅射率几乎相等。

根据我们的实验结果,溅射角分布的形状与入射离子入射的方向有很大关系,溅射产额随入射角增大而增大,溅射粒子的角分布有前倾趋势。垂直入射时,角分布形状有如橄榄核形状(图2),即 Overcosine,这与 K. Besocke^[4]等人用 8keV Xe⁺离子轰击 Ag⁽¹⁾的结果相似。

作为实验结果的定性分析,我们认为溅射角分布和溅射产额二者同时可与级联碰撞区离表面的深度联系起来。而级联碰撞区的深度可以因入射离子和靶材料的种类、入射离子能量和入射角而变化。如果级联碰撞区离表面越近,则溅射粒子离开靶面之前级联碰撞的次数越少。当级联碰撞次数少到一定程度,被溅射粒子将对入射离子的方向有一定“记忆”。因此当入射离子斜角入射时,溅射角分布出现前倾,并偏离余弦形状。入射角越大,对余弦形状的偏离也越大。当沿表面法向入射时,则出现对称的 Overcosine 形状。同时,当级联碰撞区越靠近表面时,溅射粒子逸出表面的几率越大,溅射产额也越大。对于相同的入射离子和靶材料,相同的入射离子能量,入射角越大时,级联碰撞发生在越近表面处,溅射产额就越大,对余弦分布的偏离也越大。本实验结果中的前倾现象表明由于 Ar⁺离子能量不高,级联碰撞区的深度并不大,以致总溅射产额略高于 Sigmund 和 Yamamura 的理论结果。

参 考 文 献

- [1] P. Sigmund, *Phys. Rev.* **184**(1969), 383.
 [2] K. Rödelberger *et al.*, *Z. Phys.*, **272** (1975), 127.
 [3] Y. Yamamura. *Nucl. Instr. Meth.*, **194** (1982), 515.
 [4] K. Besocke *et al.*, *Radiat. Eff.*, **66** (1982), 35.

Angular distributions of atoms sputtered with Ar⁺ ions from Ag target

Pan Haochang Tao Zhenlan Zheng Liping Cao Dexin

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

Zhang Hengshan Zhang Ahu

(Shanghai Institute of Semiconductor Device)

Zhou Zuyao Zhou Wei

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

Abstract

The experimental method is described for measuring angular distributions of sputtered particles using a sputtered particle collector and Rutherford backscattering analysis. The angular distributions are given for 100keV Ar⁺ ions sputtering of Ag at incident angles of 0°, 30°, 50° and 80°. The angular distributions have large deviations from the cosine distribution and show an anisotropy with a preferred emission in forward direction with respect to the beam. The differential sputtering yield increases rapidly with increasing angle of incidence. The total sputtering yield calculated from the angular distribution for 50 keV Ar⁺ sputtering of Ag is 16.8 ± 2.4 atoms/ion and compared with theoretical values. Finally, the results are discussed qualitatively.

Keywords: sputtering sputtering angular distribution

(1987年7月1日收到)

NH-A型中子土基含水量测定仪的研制

朱怀安 姜玉兰 尹喜林 于培英 罗品杰

(湖南省交通科学研究所)

本文介绍研制的NH-A型中子土基含水量测定仪,这是一种用来测量土基含水量的快速、精确、非破坏性的测量仪器。仪器测量误差 $\leq \pm 0.012\text{g}/\text{cm}^3$ 。

关键词: 中子 含水量 压实度 土壤 标定曲线

一、引 言

测量与控制土基的压实度,是确保土建工程(如公路、铁路路基、机场跑道、土坝堤防)施工质量的重要环节。而土基压实度是由土基湿密度与含水量决定的,为此,必须解决土基湿密度与含水量的检测手段。应用核技术进行土基湿密度与含水量的测量与传统测量方法比较,具有测量精确、快速、稳定可靠、操作方便、对所测土基无破损等优点。

NH-A型中子土基含水量测定仪是一种利用中子和物质相互作用原理而研制的表面型水分测定仪,测量深度约15cm。该样机在作了大量的室内实验后,已在多处现场试用,效果良好。

二、工作原理

NH-A型中子土基含水量测定仪使用一个同位素中子源。由中子源发出的快中子射入待测的土基内发生散射、减速、扩散,最后达到热平衡变成热中子,其中返回到中子源附近的热中子部分被热中子探测器记录。由于中子在物质中被散射而减速成热中子的作用主要由物质中的含氢量或含水量来决定,因此在一定的时间间隔内仪器所记录的热中子计数将随着土基含水量的不同而变化。将仪器放在所测土基材料上和放在一个特制的含氢量不变的标准块上作相同时间间隔的测量,所测土基材料的计数与标准块上的计数之比($N/N_{\text{标}}$)与土基含水量(M)有一定的关系。据此就能用来测量土基含水量。

三、仪器结构

该仪器主要由探头和主机(电子线路)两部分组成。

探头包括中子源、热中子探测器及前置放大器等部件,它用屏蔽电缆与主机联接。探头的基本结构如图1所示。

1. 放射源 适宜于中子土基含水量测定仪使用的中子源有 $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ 、 $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$ 和 ^{252}Cf 三种。 $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$ 中子源半衰期较长(83.2年), γ 辐射弱,且价格较便宜,是表面型水分测定仪比较理想的中子源。源强的大小根据探测器的探测效率、水分测量的精度要求、探头设计的大小及野外使用仪器的安全性等来确定。我们选用放射性活度1850MBq、中子产额 1.1×10^7 n/s的 $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$ 中子源。

2. 热中子探测器 最常用的热中子探测器是气体探测器和闪烁探测器两种。国外的中子