

表面电离的计算与测量

缴桂跃

(北京师范大学, 北京 100875)

通过对电离度和表面正离子流密度的计算以及对靶电流和负离子流的测量, 对诸如钽、铁、钨、镍、铈和铂等高功函数金属表面的电离效率进行比较研究后表明: 铁作为一种普通金属同样是较好的电离材料, 并对影响表面电离的温度、铯蒸汽压力以及表面功函数进行了讨论。

关键词: 电离器 电离度 功函数 吸附 退吸

溅射离子源普遍选用高功函数金属作为电离源。由铯炉提供的稀薄铯蒸汽的原子或分子与炽热的电离器表面相撞时, 最外层的价电子会被丢失到金属中, 而后这些粒子会以离子或原子的形式被蒸发。金属表面的功函数一般在4.5eV左右, 与铯原子的第一级电离电势(3.89eV)之差若大于 kT , 则铯原子可以全部被电离。在热力学平衡条件下, 金属对铯的吸附与退吸是共存的。

本文研究的间接加热式电离器采用高功函数金属片作为电离表面, 并通过加热器使金属片受热。铯蒸汽则直接喷射到电离器周围, 创造约13.3mPa的压力环境。间接加热方式是连续电离表面所要求的, 这是因为直接通电加热电流过大, 加热不均匀。

1 电离度及电流密度的计算

图1为间接加热式球面电离器。

在正离子表面电离过程中, 离子脱离金属表面的几率用Langmuir-Saha理论来表述。在同一时间内, 蒸发的离子数与原子数之比 α 定义为表面对该蒸汽的电离度^[1]

$$\alpha = n_i/n_a = G \exp[(\phi - I_i)/kT] \quad (1)$$

式中, n_i 和 n_a 分别为被蒸发的离子数和原子数; G 为表征原子和离子特征的统计权重因子, $G = g_i/g_a$, 例如, 单价的碱金属原子有两个电子自旋态, 而离子只有一个, 故 $G = 1/2$; $\phi = e\psi$, 是清洁表面的功函数; $I_i = eV_i$, 是铯的电离电势; k 为Boltzmann常数; 运行温度 T 选在1373 K。应该指出, 在电离表面温度低于800℃时, 由于铯原子的吸附, 表面功函数会低于本征值。

在计算电离表面的正离子流密度时, 采用了以温度 T 和覆盖度 θ 表示粒子流密度的半经验公式^[2]

$$\ln N_a = A_a + B_a/T \quad (2)$$

式中, $A_a = 61 + 4.8(\theta - \theta^2/2) + \ln \theta - 1/(1 - \theta) - \ln(1 - \theta)$, $B_a = 32.38/(1 + 0.714 \theta)$ 。

由于在 $T = 1373\text{K}$ 时表面吸附层被蒸发, θ 趋于0, 所以表面的正离子流密度可用下式表

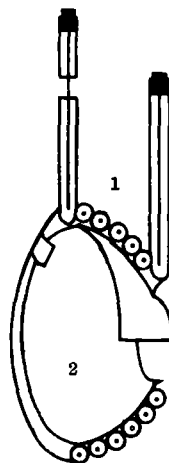


图1 电离器

1. 加热器 2. 金属片
Fig.1 An ionizer

1. Heater 2. Metal sheet

示

$$J_i = en_i = ean_a = eN_a a / (1 + a) \\ = eN_a G \exp[(\phi - I_i)/kT] \cdot \{1 + G \exp[(\phi - I_i)/kT]\}^{-1} \quad (3)$$

上式中已假设单位面积上流入的铯原子数(N_a)等于同一时间流出的离子数(n_i)与原子数(n_a)之和, 即系统处于平衡状态。

表1为利用公式(1)和(3)计算的铯的电离度和正离子流密度。

表1 利用公式(1)和(3)计算的铯的电离度和正离子流密度

Table 1 The degree of ionization and positive ion density for Cs calculated from Eq. (1) and (3)

金属 Metal	ϕ/eV	a	$J_i/\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
Ta	4.19	6.3	3.5×10^3
Fe	4.48	73	4.1×10^3
W	4.52	102.3	4.15×10^3
Ni	4.61	214	4.18×10^3
Re	4.8	1091.3	4.19×10^3
Pt	5.32	88293.8	4.19×10^3

2 正离子流的测量

溅射源中阴极所接收的正离子流, 反映了电离器的工作效率和离子源电极系统的导流状态。正离子的能量一般远远大于阴极表面的功函数, 当溅射出阴极材料的中性原子(后通过吸附层转变为负离子)时, 还会发射出二次电子。因此, 通常所测到的阴极靶电流 I_T 实际包括了正离子流 I_i^+ 、负离子流 I_i^- 和二次电子流 I_e 三方面的贡献, 即

$$I_T = I_i^+ + I_i^- + I_e \quad (4)$$

由于二次电子的能量只有几个eV, 在径向磁场的抑制下基本上不汇入负离子流, 需要单独计算。在 10^3 — 10^4 eV的入射能量内, 碱金属离子引起的二次发射系数在0.3—3[电子/离子]之间^[3], 并随能量线性变化, 故取其算术平均值, 即1.65[电子/离子]。这样就可以用靶电流 I_T 和负离子流 I_i^- 来获得正离子流的近似值:

$$I_i^+ \approx 0.37 (I_T - I_i^-) \quad (5)$$

在测量中不应忽视阴极靶电压的影响。当电离器表面的正离子流密度不再变化时, 靶电压的上升会减少空间电荷累积, 提高正、负离子流的饱和值。正离子流的饱和值与靶电压的3/2次方成正比^[4]:

$$I_i^+ = K V_T^{3/2} \quad (6)$$

式中, K 为导流系数, 是电极系统和入射离子质量的函数, 可通过解系统的Poisson方程和测量获得 K 值。本系统的 $K = 1.8 \times 10^{-9} [\text{A}/\text{V}^{3/2}]$ 。其次, 过高的靶电压会引起双重效

表2 正离子流饱和值与近似值的比较

Table 2 Comparison of saturated value and approximate value for positive ion current

金属材料 Metal material	$I_{i^+ \text{ sat}}/\text{mA}$	$I_{i^+ \text{ app}}/\text{mA}$	I_T/mA	$I_i^-/\mu\text{A}$
Ta	0.94	0.74	2.1	100
Fe	0.94	0.86	2.41	88
W	0.94	0.87	2.44	98
Ni	0.94	0.88	2.46	95
Re	0.94	0.91	2.58	110
Pt	0.94	0.90	2.55	120

应^[5],降低负离子产额,造成正离子流测量误差。实验总结发现,选用6.5kV的靶电压既可减少空间电荷的累积,还可使离子流接近饱和值。图2为离子流的测量系统简图;表2给出了利用公式(5)和(6)获得的正离子流,以及相应的靶电流和硅负离子流的测量值,表中金属材料Pt为细密铂网。

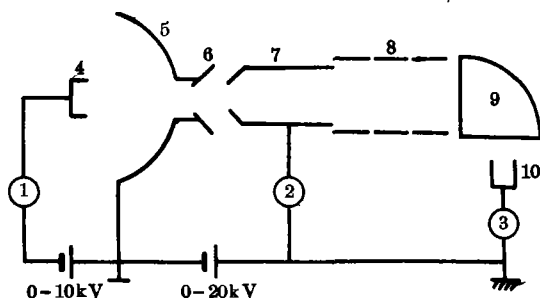


图2 离子流测量系统

1. 阴极靶电流表 2. 引出束流表 3. 分析后束流表
4. 阴极靶 5. 电离器表面 6. 负离子引出孔 7. 引出电极
8. 单透镜 9. 分析磁铁 10. 法拉第杯

Fig.2 The system for measuring ion current

1. Meter for cathode target current 2. Exit beam meter 3. Analysed beam meter 4. Cathod target
5. Ionizers surface 6. Exit aperture of negative ion
7. Extracting electrode 8. Einzel lens
9. Analytical magnet 10. Faraday cup

电离表面本身考虑,蒸发掉一个离子要比原子所需的能量大,获取能量的时间长。在退吸过程结束、表面功函数不再变化后,蒸发离子和原子的能量也固定下来,这时时间上的差异则造成 n_i 与 n_a 比值的下降。由公式(1)也可看出,当表面功函数达到本征值后,温度 T 再上升则会使 n_i/n_a 下降,并趋向饱和。

由于阴极表面需要维持半个原子吸附层^[8]以利于最佳的负离子产额,并且与电离器处于同一区域,所以在上述研究中,铯蒸汽压力和电离材料的功函数均为特定的条件。也就是说一个变化的铯蒸汽压力和低于本征值功函数的情况是没有意义的。

表面电离材料应具有较高的功函数,而铁是较适宜的材料(4.48eV)。况且,电离器的运行温度远低于铁的熔点(1535℃)。我们几次用铁片作电离表面,引出的氧(CuO靶)、硅(单晶硅)等负离子流为上百微安,并达数小时。除了高温下晶相的变化引起收缩以外,表面的挥发也极少。

在正离子流的计算中,电离表面不可能是微观均匀、没有缺陷的,特别是球形电离表面是经过反复冲压成形的,其表面的形状和连续性直接影响着正离子在阴极表面的分布、负离子束的发射度^[9]和流强。换句话说,同样的靶电流,由于分布不同,负离子流会有明显的差异^[10],甚至成反比。表2中钽和铁的结果与文献[7]的实验结果说明了这一点。

通过对6种金属的电离效率的比较,发现铁也是一种较好的电离器材料。同时悟出一点:若运行温度满足,电离表面以外的源体(大部分为铁)表面也会有正离子产生。尤其是与源体接触面较大的固体电离器,两者很容易达到热平衡,这样,杂散的正离子就不可避免

3 小结与讨论

在表面电离过程中,电离器运行温度的变化影响着正离子的产额。当表面温度所提供的能量不足以蒸发掉吸附原子时,吸附原子层会大大降低表面功函数。其幅值在2.89eV(Cs/W)—3.54eV(Cs/Ni)之间^[6]。这样,电离度几乎为零,所以测不到离子流。大约在800—1100℃(加热电流:5—13A)之间,铯原子开始退吸,表面功函数趋于本征值,正负离子流随电离器温度升高而指数增长^[7],并在1000℃后开始趋向饱和。出现饱和的原因估计有两个:(1)空间电荷在电极上的累积会降低阴极靶电压,从而导致正离子流下降;(2)从

了。所以电离器的隔热是重要的。

感谢清华大学王克礼教授的指导和所在单位的支持。

参 考 文 献

- 1 Sheldon D ed. Applied atomic collision physics. Vol.4, New York: Academic Press Inc, 1983:125
- 2 张华顺主编. 离子源和大功率中性束源. 北京:原子能出版社, 1987:273
- 3 Byrd P E, Friedman M D. Handbook of elliptic integrals for engineers and physicists. Berlin: Springer, 1954
- 4 Alton G D. Nucl Instr Meth, 1989; B37/38:48
- 5 染野 檀, 安盛岩雄编. 表面分析. 北京:科学出版社, 1980:25
- 6 Sheldon D ed. Applied atomic collision physics. Vol.4, New York: Academic Press Inc, 1983:146
- 7 缴桂跃. 核技术, 1993; 16(3):152
- 8 Krohn V E Jr. Appl Phys, 1962; 38:3523
- 9 Alton G D, Sayer R W. Phys Rev, 1990; 41(4):1770
- 10 Alton G D, McConnell J W. Nucl Instr Meth, 1988; A268:445

(1992-06-08收到 1992-09-22修回)

The calculation and measurement for surface ionization

Jiao Guiyue

(Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract

The ionization efficiencies of the high work function metal sheets, such as Ta, Fe, W, Ni, Re and Pt ionizers, were studied and compared between them by calculating the degree of ionization and positive ion densities as well as measuring the target currents and negative ion beam intensities. It was shown that Fe as a kind of general metal, was also a better ionization material. The effects of surface temperature, pressure of cesium vapour and surface work function on the surface ionization process were also discussed.

Keywords: Ionizer Degree of ionization Work function Absorption
Desorption