

用 $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$ 反应分析氢分布

钱思天 2001112187

2021 年 5 月 23 日

摘要

氢存在与空气中。在常温下，氢就可以扩散到大多数金属中，使金属的各种性能发生变化。长期以来，用常规方法很难分析样品中的氢分布状况。加速器技术和重离子核反应技术的发展和运用，使无损分析样品中的不同深度处氢的分布状况成为可能。由于入射粒子只与靶样品中的氢发生共振核反应，靶样品中其它元素对氢含量分析没有影响，因此这种方法灵敏度高，也比较准确。本实验利用了 $2\times 1.7\text{MV}$ 加速器，通过测量 $^{19}\text{F}^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$ 的共振核反应放出的光子，测量了样品中混有的氢杂质的分布。

关键词：核反应、 $2\times 1.7\text{MV}$ 加速器、氢分布

1 实验原理

氢存在与空气中。在常温下，氢就可以扩散到大多数金属中，使金属的各种性能发生变化；例如钢中含氢导致氢脆现象。其他材料中氢含量的多少也影响其性能。因此，了解材料中氢的存在和分布状况，在冶金、矿物、半导体、能源、材料等领域的研究中都很重要。

长期以来，用常规方法很难分析样品中的氢分布状况。加速器技术和重离子核反应技术的发展和运用，使无损分析样品中的不同深度处氢的分布状况成为可能。由于入射粒子只与靶样品中的氢发生共振核反应，靶样品中其它元素对氢含量分析没有影响，因此这种方法灵敏度高，也比较准确。

1. 共振核反应的选择

本实验采用 $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$ 共振核反应来测量氢在样品中的分布。入射粒子 ^{19}F 轰击靶核 ^1H 发生核反应，生成处于激发态的 ^{20}Ne 核；它退激后发射 α 粒子和处于激发态的 $^{16}\text{O}^*$ 核， $^{16}\text{O}^*$ 核退激后回到基态，同时发射 γ 光子。该共振反应的末态粒子有 α 粒子和 γ 光子。由于 α 粒子阻止本领较大，测量必须在真空中进行；因此我们在实验中只测量 $^{16}\text{O}^*$ 核退激发射的 γ 光子产额，以确定样品中氢的含量。探测 γ 光子的探测器可以放在靶室之外。

反应截面随入射粒子能量变化的曲线称为核反应的激发曲线。对应不同的入射 F 离子能量，该核反应有两个主要的共振峰，分别在 6.42MeV 和 16.44MeV。共振峰的形状可用 Breit-Wigner 公式描述：

$$\sigma(E) = \frac{\sigma_R}{1 + \frac{(E-E_R)^2}{\Gamma^2/4}} \quad (1)$$

式中 Γ 为共振峰宽度， E_R 为共振能量， σ_R 为共振截面。

实验采用 6.42MeV 的共振 $\Gamma = 55\text{KeV}$, $\sigma = 0.1\text{b}$ 测量氢分布。6.42MeV 的共振核反应产生的 ^{16}O 处于激发态，退激时发出能量分别为 6.13 6.92, 7.12MeV 的 γ 光子，如图三所示。这三支 γ 光子的分支比比值为：

$$\begin{aligned} \gamma_1 : \gamma_2 : \gamma_3 &= 2.8 : 0.016 : 0.075 \\ &\approx 97\% : 0.5\% : 2.5\% \end{aligned} \quad (2)$$

因此我们可以忽略 γ_2 和 γ_3 的贡献，测量时主要记录能量 6.13MeV 的 γ_2 光子。

采用 6.42MeV 的共振核反应，可以测量较厚度处的氢分布，因为相邻共振峰相距较远，不会相互影响。另外， ^{16}O 退激发出的 γ 射线能量较高，本底干扰很小，可以忽略入射离子与除氢以外其它核子发生核反应所放出的 γ 射线的影响。同时，也可以提高束流以缩短测量时间，而不影响测量精度。但 6.42MeV 的共振峰有一定的宽度，因此深度分布的测量精度不是很高，约为 200Å 至 300Å。

2. 氢分布分析原理

入射能量为 E_0 （高于共振能量）的氟离子打到待分析的样品上，进入样品后逐渐损失能量。设在深度为 x 处，F 离子的能量损失了 ΔE 后变为 E 。

- (a) 氟离子只在其能量为共振能量 E_R 时，才和样品中所含的氢发生核反应。入射能量 E_0 ($> E_R$) 的氟离子在进入样品一定深度（设为 x ）后，能量降为 E_R ，这时它和该深度处的氢发生反应。即

$$E = E_0 - \Delta E \approx E_0 - \left| \frac{dE}{dx} \right| \times x = E_R \quad (3)$$

因此，发生氢反应的深度 x 为

$$x = \frac{E_0 - E_R}{|dE/dx|} \quad (4)$$

氟离子束流能量 E_0 和加速器高压的关系为 $\text{HV} \times (4 + 1)\text{MeV}$ 设 (dE/dx) 的单位为 $(\text{eV}/\text{\AA})$ ，则

$$x(\text{\AA}) = \frac{[\text{HV} \times (4 + 1) - 6.42] \times 10^6 (\text{eV})}{|dE/dx| (\text{eV}/\text{\AA})} \quad (5)$$

依次改变加速器束流能量 HV，不同入射能量的氟离子就和不同深度处的氢发生反应，记录反应后产生的氧激发态退激 γ 光子产额，就可以得到样品中的氢分布情况。

- (b) 含量分析：

如前所述，实验时记录氧激发态发出的 6.13MeV 的 γ 光子，多道谱记数能量区间取为 3 – 7MeV。对应每一个高压（或氟离子入射能量）的测量点，记数时取确定的束流积分电荷；也就是每个测量点对应同样数量的入射氟离子。这样，在入射离子数一定、反应截面一定的条件下，记录到的 γ 光子越多，说明样品中的氢含量越多，即氢含量正比于在上述区间内记录到的 γ 光子数。假设标准样品中，氢沿深度均匀分布，且氢含量 C_{st} 已知，测量得到 γ 光子记数为 N_{st} 。测量未知样品得到 γ 光子记数为 N ；则待测样品的氢含量为

$$C = C_{st} \times \frac{|dE/dx|_{E=E_R} \times N}{|dE/dx|_{st; E=E_R} \times N_{st}} \times \frac{\rho_{st}}{A_{st}} \times \frac{A}{\rho} \quad (6)$$

式中 $dE/dx_{E=E_R}$ 为粒子能量为 E 时在靶物质中的阻止本领， ρ 和 A 分别为物质的密度和原子序数，下标 st 表示标准样品。

2 实验介绍

2.1 实验操作

1. 把样品装在靶盘上，装进靶室，并抽真空，接好线。靶室上接好“束流”线（通束流积分仪）和“抑制”线，“抑制”加-270V。使 BGO 探测器对准靶室窗，并加高压至 580V-600V（调节钮读数约 4.0 格）。
2. 测本底，作能量刻度。

在实验室及周围环境中，普遍存在着放射性核素钾 40 和铯 206 的本底，它们发出的 γ 光子具有确定的能量，分别为 1460.7 keV 和 2614.3 keV，可以被我们所用的 BGO 探测器探测到。从多道谱上我们可以确定这两个本底峰对应的道数。设能量-道数是线性关系，则由这两个点可以定出一条直线，这样就可以进行能量-道数的互相转换。

3. 测量标准样品。

我们用 Maestro 软件作数据获取，用束流积分仪控制记数的开始和停止（设置：“Services”；-> “Job” -> “Control” -> “D:User” -> “GATEON.JOB” -> “OK”）。根据上面本底测量定出的能量-道数关系，在多道上选取对应 3–7MeV 的道数区间，落在该区间的 γ 光子将被记数。我们所用的标准样品中，所含的氢均匀分布在约 2 μ m 的非晶硅层，该层是在单晶硅衬底上通过辉光放电沉积而成的。给定的标准样品中含氢的原子比为 13.9%。

测量时，每个点束流积分取 15–20 微库，高压从 1.30 开始取 5 个点，对应样品表面以内 5 个不同深度。5 个点的平均记数作为标准样品的记数 N_{st} 。在每个测量点，分别记录高压值、 γ 光子在 3–7MeV 区间内积分记数、测量时间、束流积分 (μ C) 和流强 (nA)。

4. 测量未知含量样品。

未知样品表面大多含氢，可测到一个表面峰。有的样品内部也有氢分布。测量时从高压 1.26 开始。

3 实验记录与数据处理

3.1 刻度

4 致谢

感谢赵捷老师和徐川老师的帮助和指导。