

半导体 α 谱仪与 α 粒子能量损失 · 预习报告

唐延宇* PB22030853

2025 年 4 月 8 日

1 实验目的

本实验旨在了解金-硅面垒半导体探测器的基本结构和工作原理,掌握 α 谱仪的操作方法,并学会利用 α 谱仪测量未知 α 源的能量以识别放射性同位素。同时,本实验还有助于理解 α 粒子通过不同材料时的能量损失规律,以及计算材料厚度的相应公式。

2 实验背景与原理

2.1 金-硅面垒半导体探测器的工作原理

金-硅面垒探测器是由一片掺杂为 N 型的硅片表面沉积一层厚度约 100–200 Å 的金薄膜而成。在金膜与近表面硅形成的 PN 结结区内,带电粒子进入后会在结区中产生与入射能量成正比的电子-空穴对。每对电子-空穴的产生能量为 W ,对硅而言,在 300 K 时 $W = 3.62 \text{ eV}$ 。在外加反向偏压作用下,所有产生的电子-空穴对都会被迅速收集形成电荷脉冲,其总电荷为

$$Q = e \frac{E}{W},$$

其中 E 为入射 α 粒子能量, e 为元电荷。电荷灵敏前置放大器将该电荷信号转换为与 Q 成正比的电压信号,且输出电压幅度不受探测器结电容变化的影响,公式为

$$V_{\text{out}} \approx -\frac{Q}{C_f}, \quad (1)$$

其中 C_f 为反馈电容,此关系保证了探测器具有良好的能量线性响应。

2.2 结区厚度与结电容的偏压依赖

半导体探测器结区的有效厚度 d_n 与外加反向偏压 V 满足

$$d_n(V) = \frac{1}{2} \sqrt{\rho_n V} \mu\text{m},$$

其中 ρ_n 为材料电阻率。同时,结电容 C_d 与 d_n 成反比:

$$C_d(V) = \frac{2.1 \times 10^4}{d_n(V)} \mu\text{F}/\text{cm}^2,$$

其中 ϵ 为硅的介电常数。通过测量不同偏压下的谱峰位置和能量分辨率曲线,可以确定探测器的最佳工作偏压,使得结电容足够小以降低噪声,但又不致过高以免漏电流增加。

*近代物理系, 19942431972, yanyutang@mail.ustc.edu.cn

2.3 能量刻度与能量分辨率评定

在实验中,使用已知能量的 α 源(如 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm 的混合源)来对多道分析器进行能量刻度。测得各谱峰在道址 d 处的位置后,通过线性拟合得到能量与道址的对应关系:

$$E = Gd + E_0, \quad (2)$$

其中 G 为能量刻度常数, E_0 为截距项,表示粒子穿过金膜等损失的能量。能量分辨率通常用全峰半高宽(FWHM) ΔE 来表示,其数值可由

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_n^2 + \Delta E_d^2 + \Delta E_e^2 + \Delta E_s^2}$$

给出,其中各项分别对应统计涨落、探测器本底噪声、电子学噪声及源或窗厚不均匀引起的展宽。

2.4 α 粒子通过物质的能量损失

当 α 粒子以非相对论速度在物质中穿行时,其主要能量损失机制是与原子电子的电离和激发作用。能量损失率(线性阻止本领)定义为

$$S = -\frac{dE}{dx}.$$

Bethe 公式在非相对论极限下可近似表示为

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N Z z^2 e^4}{mv^2} \ln \frac{2mv^2}{I}, \quad (3)$$

其中 N 为单位体积原子数, Z 为吸收体原子序数, z 为入射粒子电荷数, m 与 v 分别为粒子质量与速度, I 为吸收体的平均激发能。通过测量 α 粒子穿过薄膜前后的能量损失 ΔE ,即可反算薄膜厚度 Δx :

$$\Delta x \approx \frac{\Delta E}{\langle -dE/dx \rangle}. \quad (4)$$

3 调研：当前进展与应用

在近年的研究中,半导体 α 谱仪及其相关技术已取得多项重要进展。

首先,研究人员在探测材料方面进行了大量探索。溶液生长的钙铅溴(CsPbBr_3)钙钛矿晶体被证明在 α 谱测量中具有出色的能量分辨性能。通过对晶体厚度和前端 ASIC 电子学的优化,研究小组报告了对 ^{241}Am 源测得的 α 能量分辨率达到约 1.5 keV 的结果。这一成果展示了新型材料在低能核谱学中的潜力。

其次,基于金属磁热冷却器(MMC)的新型 α 谱仪原型正在开发之中。MMC 工作在毫开尔文级超低温环境,通过测量微小磁化变化来感知粒子能量,该技术在实验室中已实现约 1-3 keV 量级的能量分辨,有望为基础核物理研究提供更高精度的探测手段。

再次,在核医学领域,高分辨 α 成像对于靶向 α 疗法的剂量学评估至关重要。最新研究采用微通道板探测器与闪烁屏耦合的成像系统,实时记录 α 粒子在活体样本中的轨迹分布,为优化 ^{225}Ac 等 α 放射性药物的给药策略提供了有力工具。

此外,半导体 α 谱仪在环境监测和材料科学中也得到了广泛应用。例如,在地下水中氡浓度检测中,研究者将液闪计数与半导体谱仪相结合,实现了低至 0.1 Bq/L 级别的检测灵敏度。在材料无损测厚领域,通过测量 α 粒子穿过薄膜后的能量损失,可以快速且准确地计算出薄膜的质量厚度,应用于铝箔、聚酯薄膜等多种工业材料的质量控制。

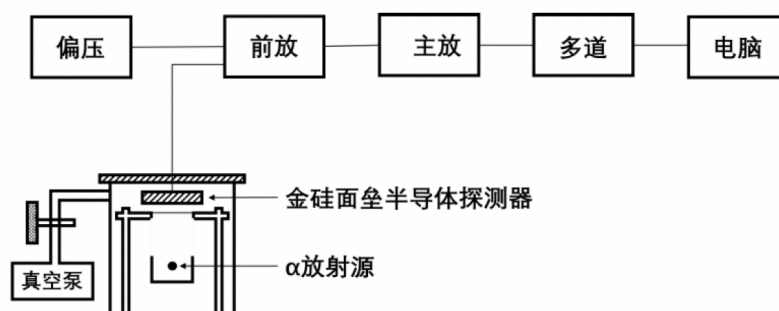


图 1: 实验装置连接示意图

4 实验步骤与注意事项

为保证实验数据的准确性和探测器的安全使用, 实验步骤和注意事项应严格遵守以下要点:

1. 将半导体探测器与前置放大器、多道分析器及高压电源按照图1正确连接, 并对探测器进行光屏蔽处理;
2. 在抽真空至 10^{-3} Torr 以下后, 逐步升高偏压至指定值, 测量不同偏压下的谱线并记录峰位与能量分辨率;
3. 使用已知能量的 α 刻度源进行能量刻度, 绘制能量—道址曲线并拟合求出刻度常数 G 与截距 E_0 ;
4. 更换未知 α 源, 在探测器与源之间插入薄膜样品, 重复测量并计算 α 粒子能量及薄膜厚度;
5. 实验结束时, 应先将高压缓慢降至零, 再关闭 NIM 机箱电源, 最后方可打开真空室盖, 以避免探测器受光损坏。