

# 一种简单的背散射处理方法

叶克江

(兰州大学现代物理系 兰州 730000)

**摘要** 阐述了利用离子束分析技术分析高温超导氧化物陶瓷 Y-Ba-Cu-O 中各成分含量的一般原理. 运用  $\alpha$  粒子在 3.045MeV 附近和 O 的弹性共振背散射以及卢瑟福背散射, 得到了 Y-Ba-Cu-O 各成分的含量, 并与质子 X 射线荧光分析的结果作了比较, 提出了一种简单的背散射处理方法. 该方法具有简单、快速、精度高等优点.

**关键词** 弹性共振背散射(EBSR) 卢瑟福背散射(RBS) 质子 X 射线荧光分析(PIXE) 等效薄靶 反应截面 阻止本领

一种简单的背散射处理方法, 即无限厚靶转换成理想薄靶的方法, 对 RBS 和 EBSR 同样有效. 应用该方法对高温超导氧化物陶瓷 Y-Ba-Cu-O (简称 S. C.) 中各成分的含量进行了定量分析. 利用 RBS 技术分析了较重的元素成分 Y-Ba-Cu 的相对含量, 由于 RBS 技术对轻元素如 O 的含量分析不灵敏, 因此又利用  $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}$  的 3.045MeV 共振分析了 O 对最重元素 Ba 的相对含量. 通过配制标样检验了该方法的适用性, 实验结果与 PIXE 得到的结果符合得好.

## 1 原理

### 1.1 无限厚靶向理想薄靶的转换

如图 1 所示, 离子束与靶面法线成  $\varphi$  角入射, 探测器位于法线另一侧与法线成  $\theta$  角. 假定: 入射能量为  $E_0 + \Delta E$  时, 得到的背散射谱为  $E_0 + \Delta E$  谱; 入射能量为  $E_0$  时, 得到的背散射谱为  $E_0$  谱; 入射能量为  $E_0 + \Delta E$  时, 样品表面某一厚度为  $X$  的薄层相应谱为  $X$  谱.  $E_0 + \Delta E$  谱和  $E_0$  谱均用无限厚靶, 几何条件及样品成分一致, 靶面光滑平整, 含量均匀.

选择  $E_0$  较大, 且使  $\Delta E/E_0 \ll 1$ . 入射能量为  $E_0 + \Delta E$  时表面散射能量为  $KE_0 + \Delta E$ , 其中  $K$  为运动学因子<sup>[1]</sup>. 离子束在穿过表面某一厚度为  $X$  的薄层后, 能量损失为  $E$ , 此时发生散射, 散射粒子再穿过  $X$  层被探测器

所探测, 探测到的能量为  $KE_0$ , 则  $X$  与  $\Delta E$  存在如下近似关系

$$\Delta E = X \left[ \frac{1}{\cos\varphi} \cdot \frac{dE}{dX} \Big|_{E_0} + \frac{1}{K \cdot \cos\theta} \cdot \frac{dE}{dX} \Big|_{K \cdot E_0} \right] \quad (1)$$

其中,  $dE/dX|_E$  表示能量为  $E$  时的阻止本领. 显然, 当  $E_0$ 、 $\Delta E$ 、入射离子种类、几何条件和样品确定时,  $X$  被唯一确定.

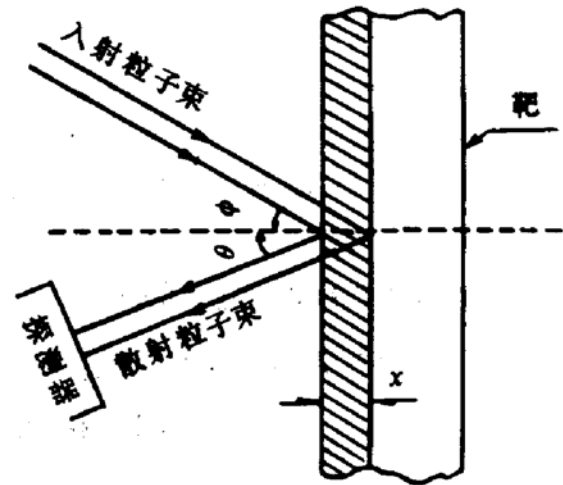


图 1

由于  $\Delta E/E_0 \ll 1$ , 且  $E_0$  较大, 可做如下假设: (1) 表面  $X$  薄层中离子能损可忽略, (2) 表面  $X$  薄层中, 阻止本领的变化可忽略.

基于以上假设, 可得出结论:  $E_0 + \Delta E$  谱为  $E_0$  谱和  $X$  谱的叠加. 因此, 只需从  $E_0 + \Delta E$  谱中将  $E_0$  谱扣除, 即得到  $X$  谱. 而  $X$  谱是入

射能量为  $E_0 + \Delta E$  时的理想薄膜 RBS 谱或 RBS 谱与 EBSR 谱的混合谱,处理起来就十分简单了.  $X$  薄层即称为等效薄靶.

$\Delta E$  的选择应遵循以下原则:(1) $\Delta E/E_0 \ll 1$ , (2) $\Delta E$  尽可能选得大些,以使同一元素的 RBS 谱前沿在  $E_0 + \Delta E$  谱上相对于  $E_0$  谱有明显移动,而且不与相邻的下一个较重元素在  $E_0$  谱上的 RBS 谱前沿发生重叠.

### 1.2 理想薄靶的 RBS 处理

设元素 1 与元素 2 的理想薄靶产额分别为  $S_1$  和  $S_2$ , 运动学因子分别为  $k_1$  和  $k_2$ , 原子序数分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ , 原子数密度分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 则有如下关系式<sup>[1]</sup>

$$S_1 : S_2 = [Z_1^2 \cdot k_1 \cdot N_1] : [Z_2^2 \cdot k_2 \cdot N_2] \quad (2)$$

通过产额的测量即可求出原子数密度的相对比例.

### 1.3 对弹性共振背散射的轻元素处理<sup>[2]</sup>

O 在入射  $\alpha$  粒子能量为 3.045MeV 时, 存在一个尖锐共振, 内禀宽度  $\Gamma \approx 10\text{keV}$ . 只需配制标准样品, 以未知样品中某一重元素为内标, 在同样条件下, 选择  $E_0$  使  $E_0$  谱对标准样品及未知样品均不含 O 的共振峰, 而  $E_0 + \Delta E$  谱均含有完整的共振峰. 利用前述方法得到  $X$  谱中 O 的 EBSR 峰与内标元素的 RBS 峰之间的关系, 以标准样品的已知参数即可推知未知样品中 O 与作为内标的元素及其它元素的原子比例.

未知样品中最重的元素为 Ba, 但以 Cu 为内标较好. 原因是 Cu 的背散射本底对 O 的 EBSR 峰影响较少, 而且 Cu 的氧化物易得到纯度高的样品, Cu 与 Ba 之间的 RBS 峰关系有着固定的比例. 只要求出标样中 O 与 Cu 的关系, 即可推知 O 与 Ba 的关系.

在  $E_0$  和  $\Delta E$  一定时, 同样的几何条件下, O 的  $X$  谱上 EBSR 峰与 Ba 的 RBS 峰产额之间存在如下关系

$$\frac{S(\text{O})}{S(\text{Ba})} = \frac{N(\text{O})}{N(\text{Ba})} \cdot \frac{T}{\sigma_{\text{Ba}}(E_0)} \quad (3)$$

式中,  $T = \int_E^{E_0 + \Delta E} \sigma_0(E') dE' / [(E_0 + \Delta E) -$

$E]$ . 其中  $\sigma_0(E')$  表示入射能量为  $E'$  时 O 的散射截面,  $\sigma_{\text{Ba}}(E_0)$  表示入射能量为  $E_0$  时 Ba 散射截面. (3) 式中  $T$  应该是一个与基体无关的常数,  $E$  是入射能量为  $E_0 + \Delta E$  时穿过  $X$  层后粒子的能量.

对于 O 和 Cu 存在着同样的关系

$$\frac{S(\text{O})}{S(\text{Cu})} = \frac{N(\text{O})}{N(\text{Cu})} \cdot \frac{T}{\sigma_{\text{Cu}}(E_0)} \quad (4)$$

另外

$$\frac{\sigma_{\text{Cu}}(E_0)}{\sigma_{\text{Ba}}(E_0)} = \frac{Z^2(\text{Cu})}{Z^2(\text{Ba})} \cdot \frac{k(\text{Cu})}{k(\text{Ba})} \approx 0.2666 \quad (5)$$

也是个比例常数, 与入射能  $E_0$  无关. 利用公式(4)求出常数  $T$ , 即可由公式(3)和(5)求出 O 与 Ba 之间的关系

## 2 实验装置及样品制备

### 2.1 实验装置

实验在兰州大学  $2 \times 1.7\text{MV}$  串列加速器上完成. 靶室结构如图 2 所示, 靶托上可同时安装多个靶片, 并可在  $(\theta, \psi)$  方向旋转, 在  $Z'$  方向平移. 从探测器中出来的信号经前放 ORTEC(142A) 和主放 ORTEC(572) 放大后由多道缓冲器 MCB 和 IBM-PC/XT 计算机记录. 束流垂直入射, 探测器位于后向角  $160^\circ$  方向上, 与靶面法线成  $\theta = 20^\circ$ .

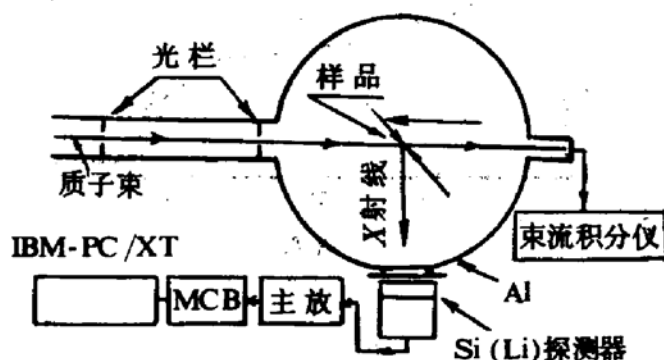


图 2

选择  $\alpha$  粒子,  $E_0 = 2.998\text{MeV}$ ,  $\Delta E = 69\text{keV}$ . 靶心对探测器张角约  $10\text{mSr}$ , 束斑约  $1.0 \times 1.0\text{mm}^2$ , 束流强度约  $20 \sim 30\text{nA}$ . PIXE 实验布局为: 入射质子与靶面法线成  $45^\circ$  角,

并在靶面法线另一侧与入射线成90°方向上探测 X 射线,探测器采用 Si(Li),其余条件与 RBS 实验类似.

### 2.2 样品制备

(1)RBS 和 EBSR 实验用的未知样品为华东师大提供的 S. C.,原子比例参考值为  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $|\delta| \leq 0.5$ ).

(2)用分析纯的 CuO(99.0%)和光谱纯

的  $TiO_2$  (99.9%)按定量比例配制标样5个. Cu 与 O 的原子比例如表1所示. 该标样用以检验  $T$  与基体的无关性,求出 EBSR O 峰与 Cu 或 Ba 的 RBS 峰之间的关系.

(3)PIXE 实验的标准样品是用分析纯的  $BaCl_2$ ,电解 Cu 片和光谱纯的  $Y_2O_3$  配制三种不同比例,每种制备九个平行样. 并取 S. C. 样品少许,也制备九个平行样.

表1

|        | Cu   | Error (%) | O     | Error (%) | Cu:O (Area) | Error (%) | Cu:O (Atom) |
|--------|------|-----------|-------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Cu-O-1 | 6322 | 2.0       | 3230  | 8.0       | 1.00:0.51   | 8.2       | 1.00:1.00   |
| Cu-O-2 | 6835 | 2.0       | 5332  | 6.1       | 1.00:0.78   | 6.4       | 1.00:1.50   |
| Cu-O-3 | 5541 | 2.3       | 5969  | 5.4       | 1.00:1.08   | 5.9       | 1.00:2.00   |
| Cu-O-4 | 5654 | 2.2       | 7158  | 5.9       | 1.00:1.27   | 6.3       | 1.00:2.50   |
| Cu-O-5 | 1006 | 2.3       | 18216 | 3.9       | 1.00:1.81   | 4.5       | 1.00:3.05   |

### 3 实验结果

1) S. C. 的  $E_0$  谱和  $E_0 + \Delta E$  谱(O 有共振)如图3,X 谱如图4,各谱均经过归一光滑. X 谱中,以 Ba 峰为基准,各峰面积、面积比例、误差如表2. 其中误差只包含统计误差.

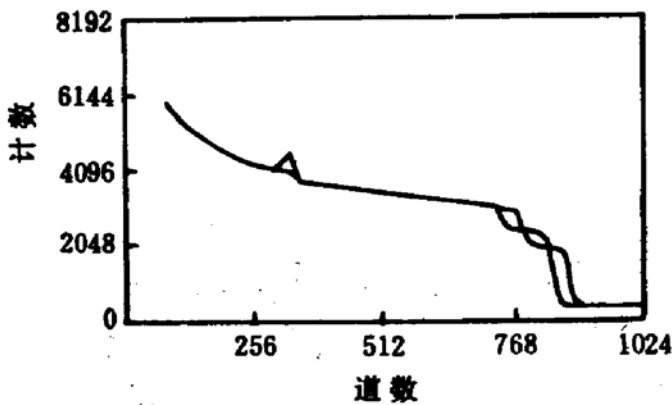


图3

#### 2)常数 $T$ 及其与基体无关性的检验

用 CuO 和  $TiO_2$  配制的五个标样,在上述实验完全相同的条件下,得到  $E_0$  谱和  $E_0 + \Delta E$  谱与图3类似,X 谱如图5所示.

标样的 X 谱峰面积比例、误差及已知原子比例如表1所列. 由表1可得 Cu-O 原子比

例为1.00:1.00时的平均产额比为

$$\frac{S(O)}{S(Cu)} = \frac{1.00}{1.00} \cdot \frac{T}{\sigma_{Cu}(E_0)} \approx 0.52 \quad (2.85\%) \quad (6)$$

尽管五个标样基体中原子比例、混和时的均匀程度、压制成片时的受力分布等都有差别,但 Cu-O 产额比与已知原子配比呈现良好的线性,说明  $T$  是一个常数,与基体无关.

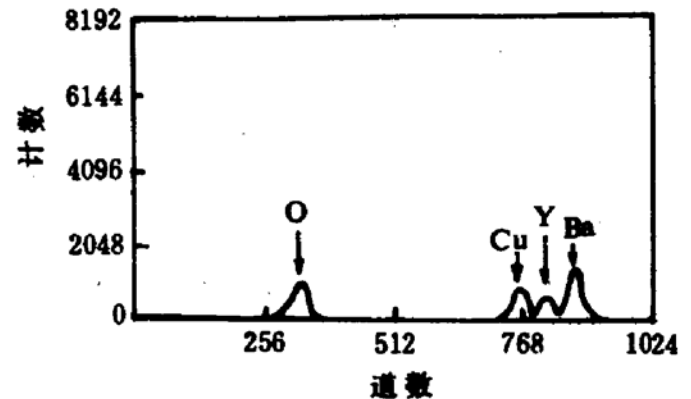


图4

由公式(2)~(6)及表2中数据可知, S. C. 中原子比例及误差如下

$$N(Y):N(Ba):N(Cu):N(O)$$

=1.02 : 2.00 : 2.76 : 6.88  
(3.7%) (3.5%) (4.4%)

=1.00 : 2.00 : 2.65  
(3.2%) (3.1%)

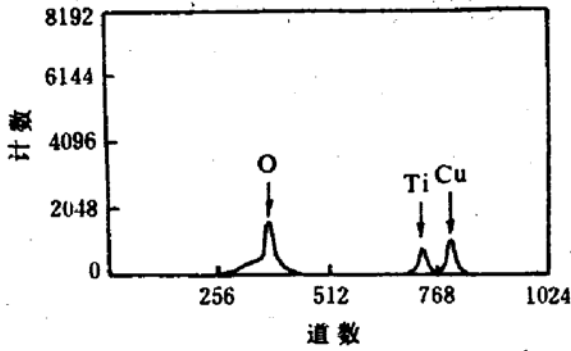


图5

表2

|       | Y     | Ba    | Cu    | O     |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 峰面积   | 6980  | 28496 | 10430 | 13597 |
| 比例    | 0.245 | 1.000 | 0.366 | 0.477 |
| 误差(%) | 4.7   |       | 5.1   | 4.9   |

### 3) PIXE 实验结果

PIXE 实验只能测量 Y-Ba-Cu 的原子比例, 结果如下

$N(Y):N(Ba):N(Cu)$

## 4 讨论

由实验结果可知, S. C. 样品中 O 的含量约 55atm%, 采用一般的 RBS 方法, O 的分析十分困难, 而且精度差. 文中提出的方法可大大提高测量灵敏度和精度. 对 X 薄层的假设是合理的, 实验结果与参考值之间都在误差范围内很好地符合. 实验误差主要来自统计涨落. 多次重复的实验表明结果稳定可靠, 即使  $\Delta E$  的变化较大也无明显影响. 该方法使利用 RBS 或 EBSR 技术分析厚样品变得简单、快速, 精度高, 而且也是非破坏性的.

## 参 考 文 献

- 1 离子束分析. 上海: 复旦大学出版社, 1985
- 2 Blanpain B, Revesz P, et al. Nucl. Instru. and Meth., 1988 B34, 459

# A Simple Method of Backscattering Analysis

Ye Kejiang

(Modern Physics Department of Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract** In this paper, the general principles of ion-beam analysis technique are described in analyzing element-contents of high-temperature superconductivity oxidised ceramic Y-Ba-Cu-O. We have obtained element-contents of Y-Ba-Cu-O by using the 3.045MeV He-4 elastic backscattering resonance (EBSR), Rutherford backscattering (RBS) and proton induced X-ray emission (PIXE).

A simple method are proposed, which deals with RBS and EBSR spectra. It is proved to be completely available.

**Key Words** EBSR RBS PIXE equivalent thin target reaction section stopping power