

能量色散 X 射线荧光分析

Xuanyi, 复旦大学核科学与技术系

摘要: 本实验报告详细介绍了能量色散 X 射线荧光分析的原理、设备及实验过程。通过使用 Si-PIN X 射线能谱仪, 我们成功地对不同样品进行了成分的定性分析。

一、引言

能量色散 X 射线荧光分析 (EDXRF) 是一种广泛应用于材料科学、环境监测、考古学和法医学等领域的分析技术。该技术通过测量样品被激发后发射的特征 X 射线来确定样品中的元素组成。EDXRF 技术具有操作简便、分析速度快、无需样品预处理等优点, 使其成为现场快速检测和实验室精密分析的理想选择。本实验旨在通过实际操作, 深入理解 EDXRF 的工作原理, 掌握 Si-PIN X 射线能谱仪的使用方法, 并通过分析不同样品的 X 射线荧光谱, 实现对样品成分的定性分析。

二、实验目的

1. 了解荧光分析原理;
2. 了解 Si-PIN X 射线能谱仪的工作原理、基本性能及使用方法;
3. 利用 X 射线荧光分析作样品成分的定性分析。

三、实验原理

3.1 特征 X 射线

原子物理中有关原子结构的量子理论中指出:

1. 原子只能存在一些不连续的稳定状态, 这些状态各有一定的能量 E_1, E_2, \dots ;
2. 原子从一个能量为 E_n 的稳定状态过渡到另一稳定状态 E_m 时, 它发射单色辐射 $h\nu = E_n - E_m$ 。

根据电子的壳层理论, 电子状态是由主量子数 n 及 l, m, m_j 这四个量子数决定的, 在原子中具有相同 n 量子数的电子构成一个壳层, 当 $n = 1$ 称为 K 壳层, $n = 2$ 称为 L 壳层, $n = 3$ 称为 M 壳层, 每个壳层内电子总数为 $2n^2$, 相应各壳层中的电子称为 K 电子、

L 电子等。在一个壳层中由于 l 不同又分为 n 个不同的次壳层，对 $l = 1, 2, 3, \dots$ 称之为 s, p, d, f 支壳层，见图1。

特征 X 射线是由于原子内层电子的跃迁，而内层电子是填满的，因此要有跃迁，必须内层能级上有空位。如果用外来的入射粒子（例如加速器上产生的质子或 α 粒子、扫描电子显微镜的电子束、X 光、放射源等）去轰击原子，使原子的内层电子获得足够的能量而脱出电子，这时核外电子轨道上出现了空位，根据电子能量总是处于最低态的原理，处于能量较高轨道上的电子就会自动地向这空位跃迁，在这跃迁的过程中按一定的频率放出光电子束，这种光电子所具有的能量即为两个能级的能量之差 $E = E_{\text{高}} - E_{\text{低}}$ ，这个能量一般为 keV 量级，属于 X 光波段，故称为 X 光，不同的元素，X 射线都具有特定的能量，故称之为元素的特征 X 射线。

特征 X 射线是属于内层电子的跃迁,它须符合跃迁的选择定则: $\Delta l = \pm 1; \Delta j = \pm 1, 0$ 。一般把跃迁向 K 层时发出的 X 射线叫做 K 线,跃向 L 层时发出的 X 射线叫做 L 线,如此类推下去,还有 M 线、N 线。为区分是哪个壳层跃迁来的电子,以及按特征线的强度排列起来又分别加上脚标 α, β, γ 等以资区别,见图1。

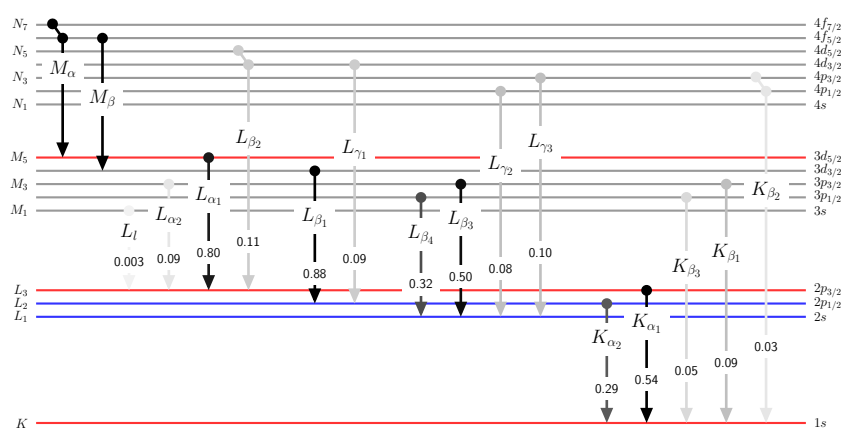


图 1 产生 X 射线的能级示意图

一般特征 X 射线能量范围从几个 keV 到几十 keV 之间, 它等于两个壳层中电子结合能之差, 例如 $h\nu = B_K - B_L$, B_K 和 B_L 为第 K 层和第 L 层电子的结合能。

由莫塞莱定律可知, 特征 X 射线能量与元素的原子序数之间有一定的关系:

$$h\nu = R_y \times Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right] \quad (1)$$

式中 R_y 是以能量为单位的里德堡常数, 可算得 $R_y = 13.6\text{eV}$, n_1 和 n_2 是跃迁壳层电子始态终态所处的主量子数。所以对于不同元素, 其发射的特征 X 射线的频率是不同的。因此测定样品中发出的特征 X 射线的能量就可用来区分不同的元素, 这就是用荧光分析作样品成分定性分析的原理。

不同元素的不同壳层间跃迁发出的特征 X 线的能量可见附录，图11是 XrayDB 开发

的 X 射线数据表¹，该数据表使用 L^AT_EX 宏包 tikz 绘制而成。

3.2 能量色散 X 射线荧光分析仪

能量色散 X 射线荧光分析装置包括激发源、高分辨率的 X 射线能谱仪系统：

3.2.1 激发源

在能量色散 X 射线荧光分析中最常用的激发源是小型低功率 X 射线管，使用连续谱激发可以同时激发样品中的多种元素，而多元素的同时测定正是能量色散 X 射线荧光分析的特点，另外亦可采用放射性同位素源作为激发源，这在要求仪器体积小、重量轻又便于携带的场合下是很有意义的。

本实验配备了小型 X 射线发生器和 ²⁴¹Am 放射源两种激发源，可变能量 X 射线源 (利用 10 mCi 的 ²⁴¹Am 放射源放出的 α 粒子激发六种金属片，退激过程放出各科元素的特征 X 射线) 用于系统的能量刻度，小型 X 射线发生器用于激发真假 1 元硬币的 X 射线荧光。

本实验采用的 Mini-X 射线源为 AMPTEK 公司的产品。电源参数为 50 kV/80 μ A，配有金靶或银靶，X 射线出射口配有 Be 窗。

3.2.2 X 射线能谱仪

X 射线荧光分析方法能否进行定量分析，这主要取决于能否将各种元素的信号分解成各个独立的成分并分别测定其强度，因此要求能量色散能谱仪的分辨率足够高。为了达到高的分辨率，通常采用液氮制冷的 Si(Li) 探测器。近年来随着平面工艺的进步，研制成功的 PIN 型光敏二极管，采用半导体制冷就可以达到很高的分辨率，使得制造小型化的 X 射线能谱仪成为可能。AMPTEK 公司的 X 射线能谱仪就由于其独特的设计和可靠性，成功地应用到火星表面的岩石和土壤的 X 射线荧光分析。我们在本实验中采用的 X 射线能谱仪系统就是 AMPTEK 公司的产品，能谱仪由 XR-100CR 型号的 Si-PIN 光敏二极管、PX4 数据处理及电源单元和电路组成。

Si-PIN 光敏二极管

XR-100 CR 是一个新型高效的 X 射线探测器、前置放大器系统，采用半导体致冷产生 Si-PIN 光电二极管工作时需要的低温。前置放大器中的输入级 FET 和一个新型的反馈电路亦工作在两级半导体制冷产生的大约 -55°C 的环境下，一个内部温度传感器对温度进行监测。探测器安装在一个避光、真空密封的 TO - 8 封装内，利用薄铍窗来实现对软 X 射线的探测。

¹项目地址：<https://github.com/xraypy/XrayDB/tree/master/poster>，编译结果的图片可以在其介绍文档中查看 <https://xraypy.github.io/XrayDB/periodictable.html#periodic-tables>

当 X 射线入射到探测器上时, 根据入射 X 射线能量不同, 能量损失可以通过光电效应或康普顿散射。对于低能的 γ 射线和 X 射线产生光电吸收的几率是很高的。探测器能够探测到光子的几率与探测器的厚度有关。详见后面的探测效率曲线, 图 6。在硅半导体探测器中, X 射线与硅原子相互作用时每损失 3.62eV 的能量就产生一个电子空穴对。为了收集电子空穴对, 通常根据 Si-PIN 探测器的厚度加 100–200 V 的偏置电压。探测器高效率地将 X 射线光子能量转换为电荷并收集后, 电荷前置放大器将探测器内产生的电荷转换为正比于 X 射线光子的输出脉冲, 此输出为一个阶跃信号, 后面的信号处理系统对该信号处理并转换为数字从而被计算机采集和处理。与通常的光反馈前置放大器不同的是, 在 Si-PIN 探测器中是通过探测器体电容向输入级 FET 注入精确电量的脉冲来实现复位的。

XR-100CR 探测器对于 5.9keV X 射线的分辨率可达 149eV, 打破了先前只能由昂贵的液氮制冷半导体探测器才能达到的水平。因此, Si-PIN 探测器在 X 射线能谱研究、X 射线荧光分析、质子束荧光分析等多个领域, 甚至艺术领域, 得到了广泛的应用。

3.3 Si-PIN 能谱仪的主要性能

3.3.1 能量分辨和线性

Si-PIN 能谱仪的能量分辨率通常以 ^{55}Mn 的 K_α 线 (5.8keV) 的半宽度来表示, 见图 5, 为了说明峰形分布的好坏, 有的还给出 FWTM 值。

对于性能良好的 Si-PIN 能谱仪系统, 它的谱线展宽主要由电离统计涨落展宽 Δ_1 和电子学噪声展宽 Δ_2 两种因素产生, 总的谱线展宽为:

$$\Delta = \sqrt{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2}$$

其中 $\Delta_1 = 2.35(\omega EF)^{1/2}$, ω 是硅材料中产生一对载流子平均消耗的能量, $\omega = 3.72\text{eV}(-55^\circ\text{C})$; $F \approx 0.12$, 称为法诺因子; E 是入射 X 射线的能量, 对于 5.89keV 的 X 射线, $\Delta_1 = 120\text{eV}$, 如果就目前 Δ_2 能达到较高的指标 70eV 而言, Si-PIN 谱仪最好的指标约为 140eV, 为了降低电子学噪声水平, 前放输入级 FET 置于低温环境中, 并使用新颖的反馈技术。

Si-PIN 探测器的能量线性是相当好的, 在一定温度下, 每产生一对载流子消耗的能量 ω 与射线种类和能量的关系不大, 而且探测器是平面结构, 灵敏区中电场分布比较均匀, 当电场足够大时, 能保证载流子充分地被收集。

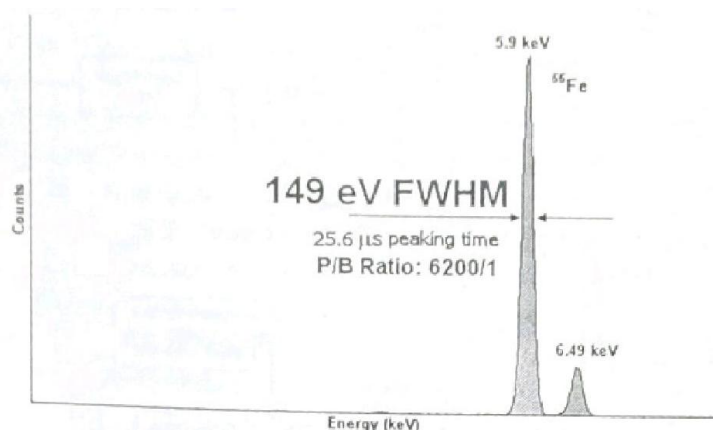


图2 6 mm²/500 μm Si-PIN 探测器对 ⁵⁵Fe 放射源的测量谱

3.3.2 探测效率

在 Si-PIN 探测器中, 探测 X 射线主要基于光电效应过程, 通常以 X 射线谱的全能峰总计数与放射源发射的相应的光子数之比来表示 Si-PIN 的探测效率, 亦称峰效率, 图3是理论计算的 Si-PIN 探测器的效率, 在 3-20keV 范围内的探测效率接近 100%, 低能端效率的降低, 主要是铍入射窗的吸收效应; 高能端效率的降低是由于随着 X 射线能量的增高, 光电效应截面下降, 以及灵敏层厚度不够, 有可能部分光子穿透出去的结果。实际应用中 Si-PIN 谱仪的探测效率, 必须通过实验来确定。

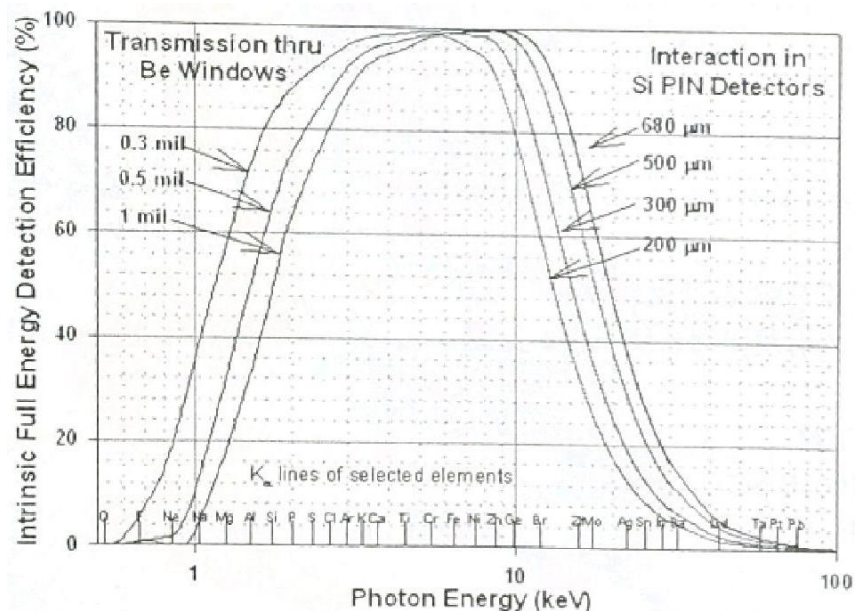


图3 XR-100CR 探测器固有探测效率 (入射到探测器表面并通过光电效应把能量沉积在探测器里的几率)

本实验采用的美国 AMPTEK 公司生产的 X 射线能谱仪系统, 具有良好的能量分辨率与能量线性, 探测器的面积为 6 mm², 探测器厚度为 500 μm, 铍窗厚度为 25 μm。由于铍窗很薄, 使用中必须非常小心保护好铍窗。

3.4 数据处理系统

通常情况下, 探测器输出的脉冲经过放大器的进一步放大和成形后, 输入到一个多道脉冲幅度分析器中累积, 被累积的谱可在计算机的屏幕上显示, 也可以被计算机存储起来并采用各种方法加以处理。

本实验中采用 AMPTEK 公司的 PX4 来完成脉冲处理, 从而把探测器和计算机连接起来。它除了提供探测器正常工作所需的各种电源外, 还包含了一个高性能的成形放大器和多道脉冲幅度分析器。脉冲处理技术和多道采用该公司的数字处理器 DP4。与传统的模拟脉冲处理技术相比, 有几点优势: 能量分辨更高、降低弹道亏损、允许的输入计数率范围更高、堆积判弃功能更好、稳定性进一步提高, 而且能够在更宽的范围内调节成形时间。PX4 通过 USB 接口与计算机相连。图4 是整个能谱仪系统的方框图。

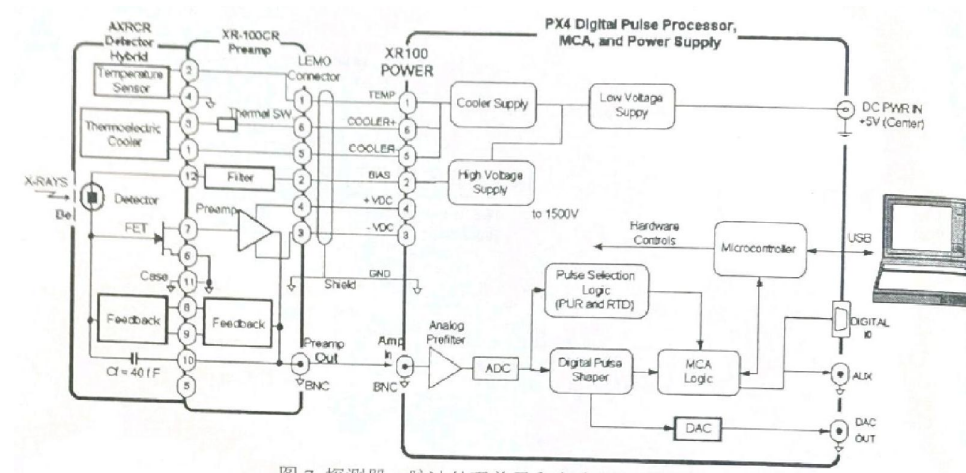


图 4 探测器、脉冲处理单元和电脑的连接方框图

通常能量色散 X 射线谱仪采用一个软件包, 可实现能谱的显示和识别 (如能量、谱线、元素种类、积分和净计数等)、谱处理 (如平滑、剥谱等)、定性分析以及根据操作者选择的方式定量分析来处理数据。

四、实验装置

表 1 实验装置列表

仪器名称	数量
^{241}Am 激发 X 射线源	1 个
X 射线发生器	1 台
XR-100 CR 探测器和 PX4 脉冲处理单元	1 套
X-123 一体化 X 射线探测系统	1 个
PC 机	1 台
真假 1 元硬币	各 1 枚
双踪示波器, TDS1001B-SC	1 台
X 射线屏蔽罩	1 个

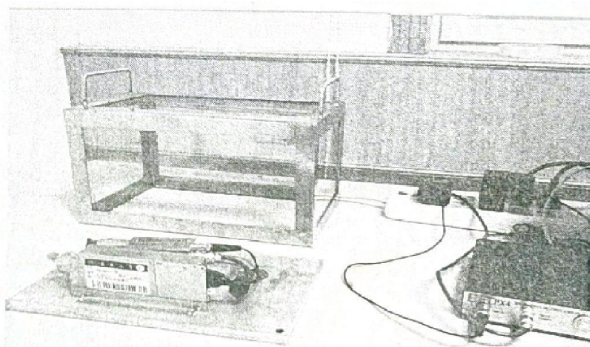


图 5 实验设备照片

五、实验内容

1. 用 ^{241}Am 源激发出来的 Cu 的 KX 射线测量 Si-PIN 谱仪的性能, 调整谱仪至最佳工作状态;
2. 利用可变能量 X 射线源对谱仪进行能量刻度, 调整谱仪至合适的工作范围;
3. 对 X 射线谱进行谱分析;
4. 对不同国家硬币的成分进行定性分析。

六、实验过程

试验台号: 2-1; 放射源编号: 16562A

1. 用可变能量 X 射线源 (由 ^{241}Am 源激发各种金属材料发出特征 X 射线) 的 Cu 的 K 壳层 X 射线, 测试谱仪的性能指标:
 - (a) 连接好线, 开启计算机, 打开设备电源, 运行控制和数据采集程序 A DMCA:
 - (b) 调入参数文件 (根据信号处理单元的型号和探测器尺寸选择相应参数文件), 记录设备出厂时的默认工作参数 (探测器偏压、探测器工作温度、成形时间、放大倍数等), 放好放射源:
 - (c) 选择合适的放大倍数, 测量 Cu 的 K 壳层 X 射线脉冲幅度分布谱, 确定谱仪的相对能量分辨率。
 - (d) 保持探测器温度、探测器偏压和放大倍数不变, 改变成形时间, 测量 $0.8\mu\text{s}$, $2.4\mu\text{s}$, $4.0\mu\text{s}$, $5.6\mu\text{s}$, $8.0\mu\text{s}$, $11.2\mu\text{s}$, $16.0\mu\text{s}$, $22.4\mu\text{s}$, $32.0\mu\text{s}$, $44.8\mu\text{s}$, $64.0\mu\text{s}$, $89.6\mu\text{s}$, $102.4\mu\text{s}$ 的 13 个 Cu 的 X 射线谱。画出分辨率随成形时间的变化曲线, 给出高能量分辨测量时成形时间的选择范围, 并分析为何厂家的推荐值为 $25.6\mu\text{s}$ (能不能选择 $100\mu\text{s}$)。

2. 对系统进行能量刻度：选择合适的成形时间和主放大器放大倍数（参数设置如表2所示），使用可变能量 X 射线源（由 ^{241}Am 激发 Rb、Mo、Ag、Ba、Tb）的五种样品的谱线, 对谱仪进行能量刻度;
3. 用 X 射线发生器产生的 X 射线, 激发硬币的 X 射线荧光谱线并进行测量, 对其成分进行鉴定。

实验过程中的参数设置情况如表2所示，其中默认值是一起厂商设置的默认值，第一步的参数设置按照表中“参数（测试时）”所在列设置，第二步和第三步的参数设置按照表中“参数（能量刻度以及测量时）”所在列设置。

表 2 仪器参数设置表

参数名称	参数（默认值）	参数（测试时）	参数（能量刻度以及测量时）
偏压	182 V	182 V	182 V
成形时间	25.6 μs	——	25.6 μs
放大倍数	22.40	22.40	22.40
预测量时间 (s)	——	120	——
总道数	1024	1024	1024

七、预习思考题

预习思考题 1. 能量分辨率的定义是怎样的？如何确定 X 射线能谱的能量分辨率？

答. 能量分辨率定义为全能峰的半高宽（FWHM）与峰位能量的比值（有时也直接定义为半高全宽）。确定 X 射线能谱的能量分辨率通常是采用不同的峰函数拟合能谱的峰值，将得到的半高全宽和峰位值（能量）做比值得到，本实验中采用的峰函数是 Gauss 峰。

预习思考题 2. 能谱测量系统的成形时间通常应该怎样选择？

答. 成形时间往往通过试验确定，其选择应使得系统的能量分辨率最小。

预习思考题 3. 采用一系列能量的 X 射线进行能量刻度时，应该如何选择放大倍数？

答. 选择放大倍数时，应确保所有能量的 X 射线信号都能在多道分析器的动态范围内被有效放大。通常，放大倍数应使得最高能量的 X 射线信号接近但不超出多道分析器的最大量程。

预习思考题 4. 数据处理软件 origin 高斯拟合后峰的半高宽的定义是怎样的？

答. 高斯拟合后峰的半高宽（FWHM）是指峰的高度一半处的宽度，它是衡量峰形尖锐程度的一个重要参数。有时半高全宽作为拟合参数替代方差 σ ，如果不是，则需要利用公式转化

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$$

当然，很多拟合工具包也会自动报告全宽的结果，大多也是根据上面公式自动计算而来。

预习思考题 5. 如何根据 X 射线能谱确定样品的成分？

答. 通过分析 X 射线能谱中的特征峰，可以确定样品的成分。每个元素都有其特定的 X 射线能量，因此通过识别和测量这些特征峰的能量，可以推断出样品中存在的元素。

实际操作时，直接根据寻峰或者拟合得到的峰位值寻找是不现实的，因为即便测量精度再高，也很难得到和参考值完全一致的峰值。我们考虑在拟合得到的半高全宽范围内寻找可能的特征 X 射线

这里提供一个 python 工具包 `roentgen`²，可以输入能量范围，自动在数据库中寻找满足范围要求的特征 X 射线。

八、实验结果和分析

8.1 测试谱仪的性能指标，确定最佳成形时间

本小节对应第六节第一步的测量结果，测量不同成形时间的条件下 Cu 的荧光 X 射线的能谱。根据谱线，我们使用了双 Gauss 峰拟合了 Cu 的能谱曲线，部分结果如图6所示。

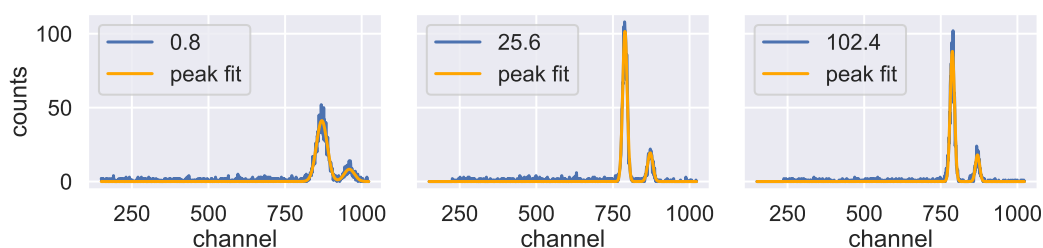


图 6 不同成形时间的峰拟合效果

图7是分辨率随着成形时间变化的结果。当成形时间较低时，分辨率较差，随着成型时间增加到 $20\mu\text{s}$ 左右出现最优值。此后随着成形时间不断增加，分辨率缓步保持围挡。可以确定，最佳分辨率出现在 $20\mu\text{s}$ 左右。这就是厂商设置成型时间的默认值为 $25.6\mu\text{s}$ 的原因。虽然更长成型时间并没有造成分辨率的明显下降，但是更长的成型时间容易造成信号堆积，对于强度较强的 X 射线分析是不利的。

有一些意外的是在 $20\mu\text{s}$ $30\mu\text{s}$ 之间，分辨率存在一个和总体趋势相反的小回升。初步推断这可能是由于这两组数据是最先测量的，而机器最初尚未预热完全导致的。后续可以进一步实验验证这一猜想。

²<https://roentgen.readthedocs.io/en/latest/examples/tutorial4.html>

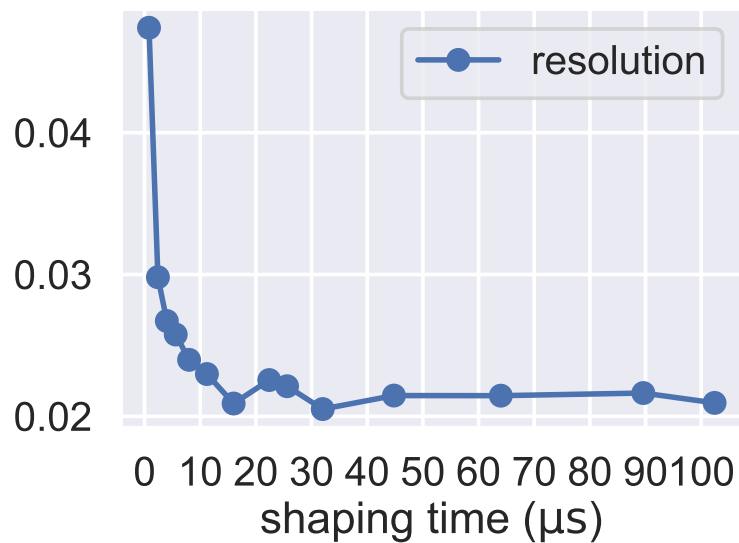


图 7 不同成形时间的分辨率和成形时间的关系

8.2 能谱定标

本实验接下来在成形时间为 $25.6\mu\text{s}$ ，调整其他参数后，使用Rb、Mo、Ag、Ba、Tb元素的荧光 X 射线进行定标。定标的结果如图8所示

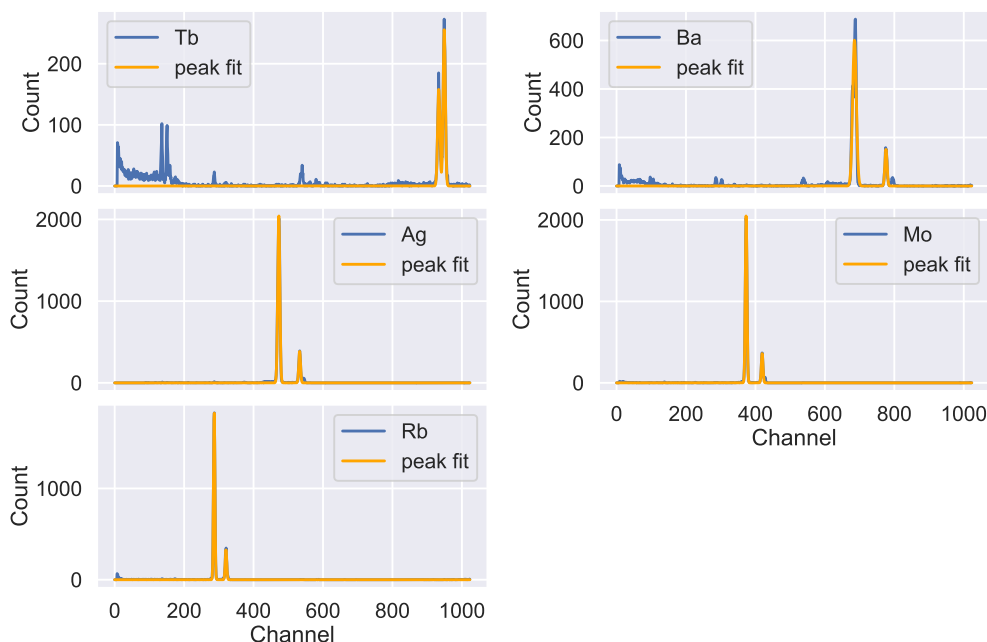


图 8 不同元素的谱线拟合结果

我们使用能谱中的最高峰的峰中心作为 x 值，使用这些元素的最强 X 特征辐射射线的能量的作为 y 值进行线性拟合。元素的谱线最高峰中心值和元素的最强射线能量

($K\alpha 1$ 射线) 如表3所示, 拟合得到的结果如图9所示。

表 3 能量刻度相关参数, 最强峰 (keV) 的数据来自工具包 roentgen, 最强峰 (道数) 则是 Gaussian 峰拟合结果

元素	最强峰 (keV)	最强峰 (道数)
Tb	44.48	949.1
Ba	32.19	685.3
Ag	22.16	472.6
Mo	17.48	373.3
Rb	13.40	286.7

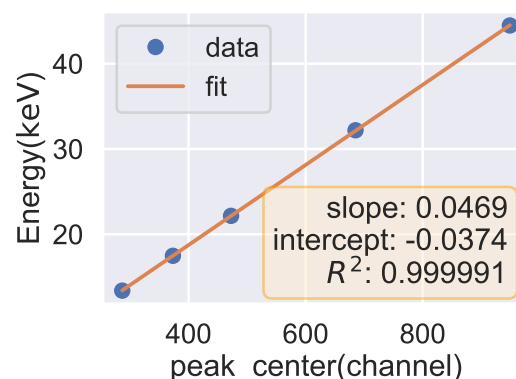


图 9 能量刻度

8.3 样品的 X 荧光谱线的测量以及定性分析

我们选取了真壹元人民硬币、假壹元人民硬币、新加坡币作为样品, 探测了他们的荧光 X 射线。

得到荧光 X 射线谱后, 我们先使用使用寻峰算法筛选出了突出度 (prominence) 大于 500 的峰值, 然后根据得到的峰总数进行多峰拟合。结果如图10所示, 图中标注了拟合峰的中心值。

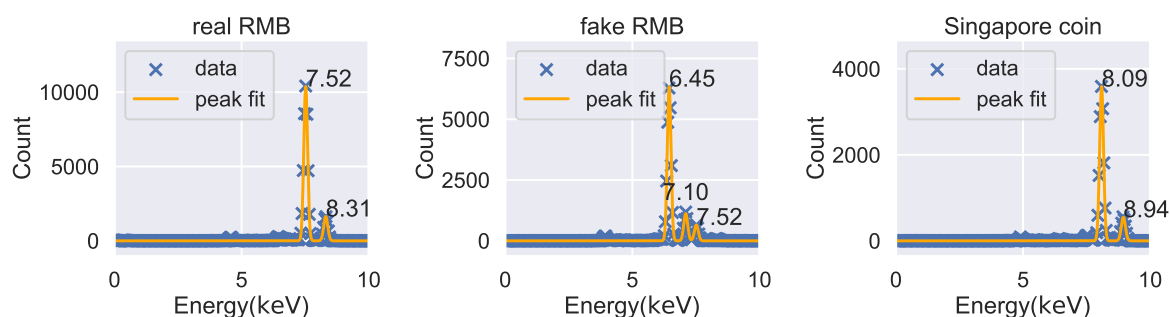


图 10 三种样品的荧光 X 射线谱; 图中 real RMB,fake RMB,Singapore coin 分别代指真壹元人民硬币、假壹元人民硬币、新加坡币作为样品

对于真壹元人民币, 我们寻找了在其半高全宽范围内的可能的特征 X 射线, 结果如表4和表5所示

表 4 峰名称: 真人民币 1; 峰中心:7.52; 半高全宽:0.18; 峰面积:1957

能量 (eV)	Z	元素	谱线名	相对强度
7461	28	Ni	K α 2	51
7478	28	Ni	K α 1	100
7480	63	Eu	L γ 1	10
7525	67	Ho	L β 1	64
7604	75	Re	L1	5
7605	71	Lu	L α 2	11

表 5 峰名称: 真人民币 2; 峰中心:8.31; 半高全宽:0.19; 峰面积:327

能量 (eV)	Z	元素	谱线名	相对强度
8265	28	Ni	K β 1,3	17
8268	78	Pt	L1	5
8335	74	W	L α 2	11
8398	74	W	L α 1	100
8402	70	Yb	L β 1	65

可以发现，明显的峰有两个，在峰面积更大的峰中，存在 Ni 的 K α 1 谱线，同时存在一些其他元素的谱线。但是其它谱线并不是 K α 1 谱线。如果其他元素存在，应该可以更明显的探测到它们的 K α 1 谱线。所以推测该峰是元素 Ni 产生的。另一个峰并没有发现某个元素的 K α 1 谱线，但是存在 Ni 元素的高阶跃迁谱线，所以推测改峰也是由 Ni 产生的。于是从荧光 X 谱线推测真壹元人民币是主要是由 Ni 组成，而现行壹元人民币是钢芯镀镍制成的，我们的探测结果与之相符。

对于假壹元人民币，我们探测到三个峰，结果如表6、表7和表8所示

表 6 峰名称: 假人民币 1; 峰中心:6.45; 半高全宽:0.17; 峰面积:1161

能量 (eV)	Z	元素	谱线名	相对强度
6391	26	Fe	K α 2	50
6404	26	Fe	K α 1	100
6456	63	Eu	L β 1	62
6458	66	Dy	L α 2	11
6490	25	Mn	K β 1,3	17
6495	66	Dy	L α 1	100

表 7 峰名称: 假人民币 2; 峰中心:7.10; 半高全宽:0.18; 峰面积:216

能量 (eV)	Z	元素	谱线名	相对强度
7058	26	Fe	K β 1,3	17
7103	64	Gd	L β 2,15	21
7133	69	Tm	L α 2	11
7173	73	Ta	L1	5
7178	62	Sm	L γ 1	10
7180	69	Tm	L α 1	100

表 8 峰名称: 假人民币 3; 峰中心:7.52; 半高全宽:0.18; 峰面积:125

能量 (eV)	Z	元素	谱线名	相对强度
7461	28	Ni	K α 2	51
7478	28	Ni	K α 1	100
7480	63	Eu	L γ 1	10
7525	67	Ho	L β 1	64
7604	75	Re	L1	5
7605	71	Lu	L α 2	11

从表中可以推测，假壹元人民币是组成可能是 Fe 和Ni，其中第一、第二个峰是 Fe

产生的，而第三个峰是 Ni 产生的。

对于新加坡币，其半高全宽内可能的特征 X 射线如表9 和表10，可以推测其主要成分是 Cu 。

表 9 峰名称: 新加坡币 1; 峰中心:8.09; 半高全宽:0.18; 峰面积:691

能量 (eV)	Z	元素	谱线名	相对强度
8028	29	Cu	Kα2	51
8046	77	Ir	L1	5
8048	29	Cu	Kα1	100
8088	73	Ta	NaN	11
8101	69	Tm	Lβ1	64
8102	65	Tb	Lγ1	11
8146	73	Ta	Lα1	100

表 10 峰名称: 新加坡币 2; 峰中心:8.95; 半高全宽:0.19; 峰面积:112

能量 (eV)	Z	元素	谱线名	相对强度
8905	29	Cu	Kβ1,3	17
8912	76	Os	Lα1	100
8953	81	Tl	L1	6
9023	72	Hf	Lβ1	67

九、实验结论

- 1. 通过设置不同的成形时间的测量Cu 的荧光 X 射线的能量分辨率，验证了厂商设置成型时间默认值为25.6μs 的合理性；
- 2. 通过不同元素荧光 X 射线的定标并且对样品的测量，推测了样品组成：
 - (a) 真壹元人民币样品：探测到的主要成分为镍；
 - (b) 假壹元人民币样品：探测到的主要成分为铁和镍；
 - (c) 新加坡硬币：探测到的主要成分为铜。

X-ray Absorption and Emission Energies of the Elements

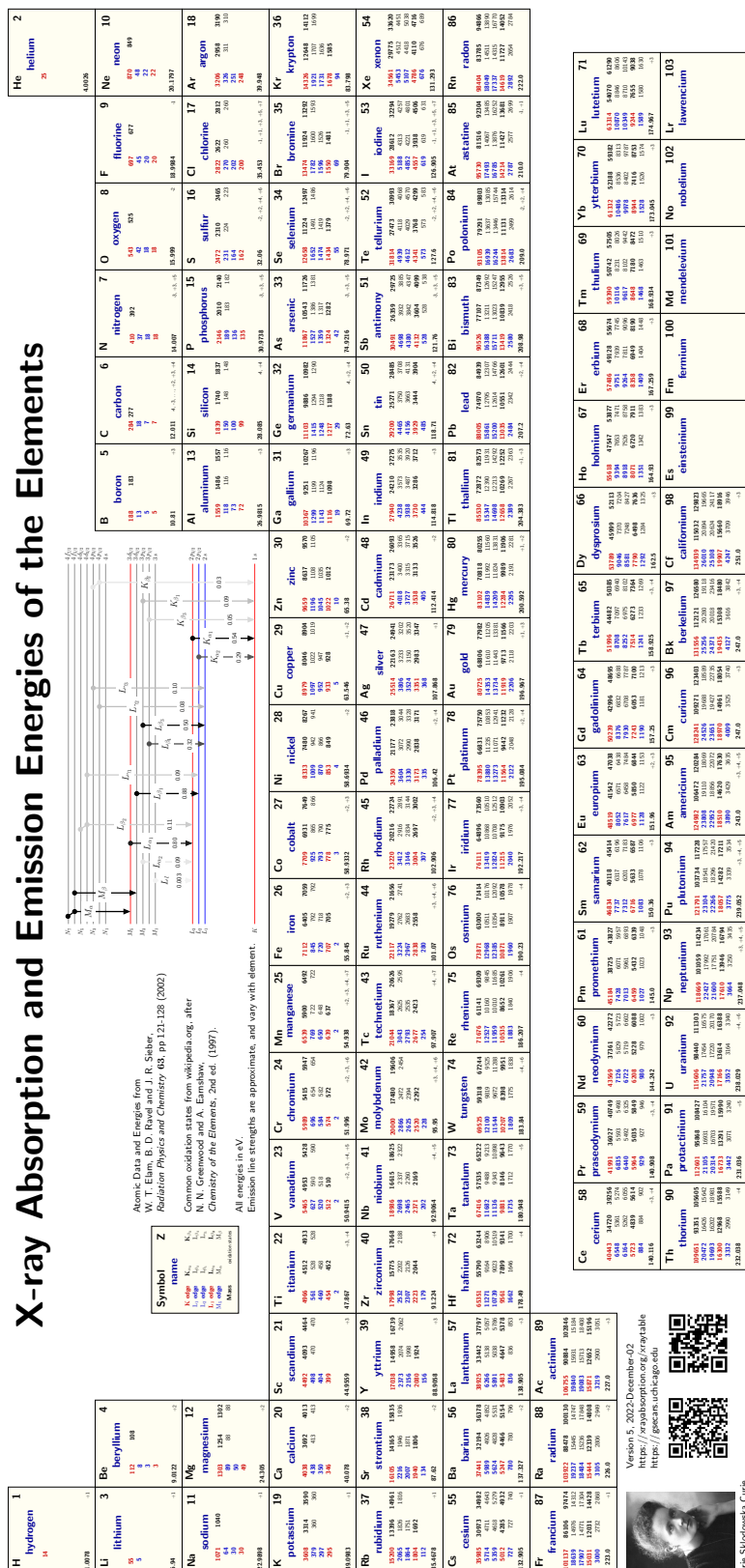


图 11 不同元素的 X 射线