

# 用正比计数管测量超软 X光源的辐射强度

杨名恪

## 引言

对于超软X光源辐射强度的绝对测量,由于缺乏稳定的光源标准而难于进行。通常,只能用同步辐射或用其标定过的探测器进行测量。致使测量受到极大的限制。特别对于一些准确度要求不高的测量,更感不便。利用超软X射线正比计数管测量超软X光源的绝对辐射强度是初次尝试。由于正比计数管具有良好的能谱分辨率,故对于较粗略的测量,可不用单色仪而直接测量。

该方法基于光电离效应。进入正比计数管的光子每产生一次电离过程便产生一次单次数。因此,根据总计数便可计算光辐射的绝对通量。但是,在实际测量中,存在两方面的入射光子的损失。其一是入射光子不全都参加电离。在本文中引入修正量 $\eta_1$ 进行修正。其二是参加电离的光子不全被计数,即存在漏计数。在本文中引入 $\eta_2$ 予以修正。这样就完全可以测出入射辐射的绝对强度。其准确度取决于计算中忽略的诸因素及正比计数管的稳定性。该方法与用同步辐射标定探测器的方法相比较,二者除在测量准确度上有差异外,并无本质区别,都是以对探测器进行必要的修正为基础。前者是计算确定修正量,后者是实际测定修正量。

## 一、测量装置

测量系统的方块图,如图1所示。X光源产生的超软X射线,由超软X射线正比计数管接收后,产生输出脉冲信号。该脉冲通过低噪声电荷灵敏前置放大器、主放大器、多道脉冲幅度分析器进入打印机或描图仪进行记录。

被测X光源是小焦斑电子激发的超软X射线源。其原理结构示于图2。X光源由真空腔体、可转动靶面支承轮和电子枪三部份组成。其优点是靶电流与靶极电压无关,仅取决于电

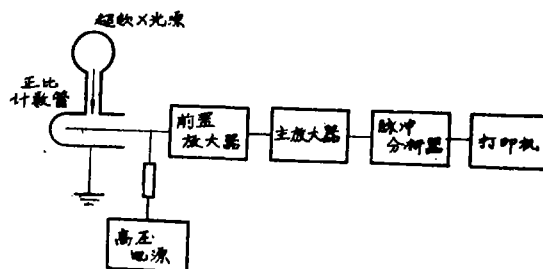


图1. 超软X射线源测量系统

子枪的调制电压和阴极热子的加热电流。轰击电子束的焦斑直径为 50~100 微米。八个靶面固定在靶轮上，转动靶面使其依次接受电子束的轰击，从而获得八种不同元素的特征 X 射线。测量中采用了 4 微米厚 Mylar 膜窗密封型超软 X 射线正比计数管<sup>[1]</sup>。

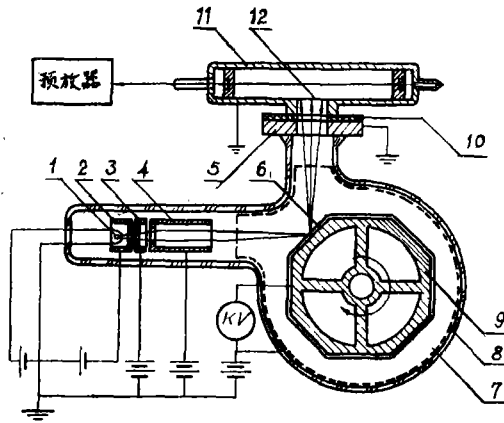


图 2. 超软 X 光源原理结构图

1. 阴极；2. 调制极；3. 阳极；4. 聚焦极；5. 工作平台；6. 靶面；7. 导电层；
8. 真空腔外壳；9. 靶面支承轮；10. 密封橡皮圈；11. 超软 X 射线正比计数管；
12. 正比计数管窗口有机膜。

## 二、超软 X 光源的辐射强度

超软 X 射线因其波长较长，与硬 X 射线相比，其光学属性更为显著。对于小焦斑 X 光源，因其焦斑小，可视为理想点光源，故采用单位时间单位立体角内 X 光源发出的光子数表征其辐射强度。当用正比计数管进行测量时，由于入射光子不全部参加电离而参与电离的光子又不全部被计数，这便限制了正比计数管的总探测效率。从而，X 光源的辐射强度可示为：

$$I = \frac{n}{\eta\omega} \quad (1)$$

式中  $I$ ：X 光源的辐射强度（光子数/秒·球面度）；

$n$ ：计数管实测计数率（扣除本底计数）；

$\omega$ ：计数管窗口所对应的立体角（本文为 0.3 球面度）；

$\eta$ ：测量系统的总探测效率。

测试系统的总探测效率与正比计数管的探测效率及测试系统的分辨时间  $\tau$  造成的漏计数有关，且有：

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (2)$$

式中  $\eta_1$ ：正比计数管的探测效率；

$\eta_2$ ：测量系统的分辨时间  $\tau$  所产生的漏计数率对总探测效率的影响。

若取 X 光源的总辐射量为  $F$ （单位：光子数/秒），则有：

$$F = \Omega I \quad (3)$$

式中  $\Omega$ ：源的出射口所对应的立体角；

$I$ ：源的辐射强度（光子数/秒·球面角）。

### 三、探测效率 $\eta_1$ 的确定

正比计数管的探测效率 $\eta_1$ 主要取决于正比计数管的结构和性能。它与所使用之正比计数管的加固栅网、窗膜材料及在其上蒸涂的铝导电层对超软X射线的透过率有关,与计数管工作气体的吸收率、电子在计数管中的复合、计数管的末端效应、死时间、壁效应以及记忆效应等因素有关。在测量计算中,必须对上述诸因素加以考虑和修正。

电离电子在计数管中的复合,主要发生在这场强趋于零的入射窗附近的死区中。为此,我们在正比计数管的设计中,采用了圆柱型窗膜结构<sup>[1]</sup>,以消除死区,使电离电子的复合降至最小,以致在计算中可以忽略。通过选择适当的计数管的径长比(直径与长度之比)和加装准直窗环将灵敏区限制在计数管的中部,可以基本上消除末端效应的影响。计数管死时间所造成的漏计数将影响其探测效率。但是,由于该类型计数管的死时间很小<sup>[2]</sup>(约为0.5微秒),远小于测量系统的分辨时间(约6.2微秒),因此,其漏计数将包括在系统的分辨时间引起的漏计数中。在计算中,将由 $\eta_2$ 给予补偿。在正比计数管的设计中,由于选择了适当的 $PL$ 值( $P$ :气压,  $L$ 光子穿越气体的光程),使进入计数管的X光子在未达到阴极管壁之前,即被完全吸收。因此,其壁效应和记忆效应都可忽略不计。于是,我们所用的正比计数管的探测效率 $\eta_1$ 可表示为:

$$\eta_1 = e^{-\mu_1 \xi_1} (1 - e^{-\mu_2 \xi_2}) e^{-\mu_3 \xi_3} \cdot J \tag{4}$$

式中 $e^{-\mu_1 \xi_1}$ : 计数管窗膜材料的透过率;

$(1 - e^{-\mu_2 \xi_2})$ : 计数管所充气体的吸收率;

$e^{-\mu_3 \xi_3}$ : 计数管窗膜铝导电层的透过率;

$J$ : 计数管窗膜加固栅网的透过率(本文为90.2%)。

上述诸量中的 $\mu$ 和 $\xi$ 分别为诸元素的质量吸收系数和质量厚度<sup>[1]</sup>。 $\mu$ 值随入射X射线波长的变化而变化。

### 四、修正量 $\eta_2$ 的确定

$\eta_2$ 是为了补偿测试系统的分辨时间 $\tau$ 造成的漏计数而引进的修正量。它和测试中使用的正比计数管的性能及测量电路的甄别阈有关。可由下式表示:

$$\eta_2 = \frac{n}{n_0} \tag{5}$$

式中 $n$ : 计数管实测计数率(不包括本底计数);

$n_0$ : 真正射入计数管并产生光电离的光子计数率。

由文献<sup>[3]</sup>知:  $n_0 = \frac{n}{1 - n\tau}$  (6)

将(6)式代入(5)式则有:

$$\eta_2 = 1 - n\tau \tag{7}$$

式中 $\tau$ 为测量系统的分辨时间,可由实验测定。其测定方法如下:取两个独立的源,以 $n_{01}$ 、 $n_{02}$ 分别表示源1和源2在单位时间内真正射入计数管并产生电离的光子数(包括本底)。以 $n_{012}$ 表示源1和源2在单位时间内,真正射入计数管并产生电离的光子数(包括本底)。 $n_0$ 表示计数管真正的本底。再以 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_{12}$ 和 $n_b$ 表示相应于以上各量的实测值。则有:

$$n_{01} + n_{02} = n_{012} + n_{0b} \quad (8)$$

将(6)式代入(8)式得:

$$\frac{n_1}{1-n_1\tau} + \frac{n_2}{1-n_2\tau} = \frac{n_{12}}{1-n_{12}\tau} + \frac{n_b}{1-n_b\tau} \quad (9)$$

通常 $n_b$ 很小,  $n_b\tau \leq 10^{-4} \ll 1$  (本文 $n_b\tau \approx 10^{-5}$ ) 若 $n\tau$ 也满足 $\ll 1$ 的条件, 该条件可通过控制计数管窗口的有效面积来达到, 则有:

$$\frac{n}{1-n\tau} \approx n(1+n\tau)$$

$$\frac{n_b}{1-n_b\tau} \approx n_b$$

故可得:

$$\tau = \frac{n_1 + n_2 - n_{12} - n_b}{n_{12}^2 - n_1^2 - n_2^2} \quad (10)$$

$\tau$ 仅和测量系统有关, 与入射X光子的波长无关。因此, 对于给定的测量系统 $\tau$ 为常量。

在测量中, 我们利用含有碳和铝二种成分的靶同时产生的C-K $\alpha$ 和Al-K $\alpha$ 二种特征X射线, 作为二个独立的源。分别测出 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_{12}$ 和 $n_b$ , 求得测量系统的分辨时间 $\tau = 6.2 \times 10^{-8}$ 秒。将此值代入(7)式, 则可根据X射线源的实测计数率 $n$ , 很方便的求出 $\eta_2$ 。

## 五、测量结果

在最佳靶电压和最佳上靶电流的条件下, 我们对图2所示之X光源进行了测量, 分别测

表1

参 量 谱 线	$n$ (1/秒)	$\eta_1$ (%)	$\eta_2 = 1 - n\tau$ (%)	$\tau$ (秒)	$\eta = \eta_1\eta_2$	$\Gamma = \frac{n}{\eta\omega}$ (1/秒球面度)
Al-K $\alpha$ (8.34Å)	$1.27 \times 10^4$	45	92.1	$6.2 \times 10^{-8}$	0.414	$1 \times 10^8$
C-K $\alpha$ (44.7Å)	$2 \times 10^4$	9	87.5	$6.2 \times 10^{-8}$	0.079	$8.4 \times 10^8$
B-K $\alpha$ (67.6Å)	$2 \times 10^3$	0.5	98.8	$6.2 \times 10^{-8}$	$4.9 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^7$

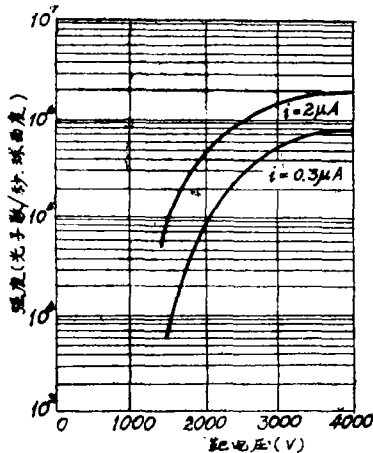


图3. Al-K $\alpha$  X射线强度随靶电压的变化,  $i$  为靶电流。

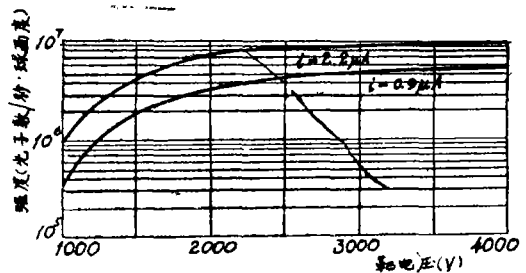


图4. C-K $\alpha$  谱线强度随靶电压的变化,  $i$  为靶电流。

了A1-K $\alpha$ 、C-K $\alpha$ 和B-K $\alpha$ 特征谱线的绝对辐射强度。测量结果示于表1。由于各种特征X射线的辐射强度随X光源的靶电压及靶电流密度的改变而改变,所以我们又测量了特征X射线的强度随X射线源靶电压的变化曲线,如图3和图4所示。

## 六、测量结果的精确度和准确度

一种测量方法所得结果的好坏,通常用精确度和准确度两个指标来评价。

在X光源靶电压为2600伏,靶电流为0.35微安,正比计数管工作电压为1400伏的条件下,对A1-K $\alpha$ 和C-K $\alpha$ X射线的强度各测量了五组数据,每组12次。计算获得其测量精确度为:0.5%~1.2%(相对标准差)。

为了验证该测量方法的准确度,我们取100微居里的<sup>56</sup>Fe同位素放射源为参考标准,以其已知强度为真值,计算了测量结果的准确度。由于测量结果是以光子数/秒球面度为单位给出的,因此,必须把以微居里为单位的<sup>56</sup>Fe的放射性强度换算成光子数/秒球面度单位来表示。根据<sup>56</sup>Fe同位素的衰变规律,可表示如下:

$$x_0 = \frac{1}{2\pi} \eta_f G_0 e^{-\frac{0.693}{T} t} \quad (11)$$

式中 $x_0$ :以光子数/秒球面度为单位的<sup>56</sup>Fe的放射性强度,以此作为计算准确度的真值。

$\eta_f$ :<sup>56</sup>Fe同位素放射源在 $2\pi$ 立体角中的实际光子输出率( $\eta_f = 3 \times 10^6$ 光子数/毫居·秒)。

$G_0$ :<sup>56</sup>Fe开始衰变时的放射性强度,其值为0.1毫居里。安装准直孔后,其强度减至 $7.6 \times 10^{-3}$ 毫居里。

$T$ :<sup>56</sup>Fe的半衰期(949天);

$t$ :从<sup>56</sup>Fe源开始衰变到测量时所经过的时间(此源为847天)。

实验中,共测了四组数据,每组14次。计算获得其测量准确度为30%~31%。目前,国外在该波长范围(2 Å~100 Å)内的测量,主要使用盖革计数管。其测量准确度为10%~30%<sup>[4]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 杨名恪、崔松鹤;核仪器与方法,1982,2,76.
- [2] Eugene P.B.;《Introduction to X-Ray Spectrometric Analysis》,Plenum Press; New York and London,1978,188.
- [3] 王祝翔;《核物理探测器件及其应用》科学出版社,1964,101~103
- [4] 增冈俊夫;《ガス电离箱による真空紫外線の絶対強度測定》,昭和51年12月,3~4,