

中 华 人 民 共 和 国

国家计量检定规程

用<sup>152</sup>Eu点状 $\gamma$ 标准源校准锗 $\gamma$ 谱仪

JJG 417—86

# 目 录

一 概述.....	(1)
二 技术要求.....	(1)
三 检定条件.....	(2)
四 检定项目和检定方法.....	(3)
(一) $\gamma$ 谱仪性能试验.....	(3)
(二) 效率校准.....	(5)
五 检定结果处理.....	(7)
六 检定周期.....	(7)
附录 1 铯-152 $\gamma$ 射线能谱图.....	(8)
附录 2 符合相加效应的修正.....	(9)
附录 3 检定证书格式.....	(13)

---

用<sup>152</sup>Eu点状γ标准源校准  
锗γ谱仪检定规程

Verification Regulation of Ca-  
libration for Ge-γ-ray Spectro-  
meter by <sup>152</sup>Eu point γ-ray  
Standard Source



JYG 417—86

---

本检定规程经国家计量局于 1986 年 2 月 1 日批准，并自 1987 年  
1 月 1 日起施行。

归口单位： 中国计量科学研究院

起草单位： 中国计量科学研究院

本规程技术条文由起草单位负责解释。

**本规程主要起草人：**

于凤翹 谭金波 （中国计量科学研究院）

## 用 $^{152}\text{Eu}$ 点状 $\gamma$ 标准源校准锗 $\gamma$ 谱仪检定规程

本规程适用于用 $^{152}\text{Eu}$ 点状 $\gamma$ 标准源在244~1048 keV能量范围内校准新制造、使用中和修理后的同轴锗(铯) $\gamma$ 谱仪或同轴高纯锗 $\gamma$ 谱仪的全吸收峰探测效率,判断其是否具有总不确定度为(2~3.5)%的水平。

### 一 概 述

锗(铯) $\gamma$ 谱仪和高纯锗 $\gamma$ 谱仪用于测量放射源的 $\gamma$ 发射率或相对 $\gamma$ 发射率。

典型的锗 $\gamma$ 谱仪是由锗探测器(带有液氮恒温器,前置放大器以及高压滤波器),高压电源,线性放大器,多道分析器和数据读出设备组成。 $\gamma$ 射线与探测器作用,产生电脉冲信号由电子学系统分析和计数。根据所测 $\gamma$ 射线谱中全吸收峰面积(计数)及所用标准源的已知 $\gamma$ 发射率可以定得全吸收峰探测效率。用多个能量的 $\gamma$ 射线可以定得探测效率对能量的关系曲线,内插出任意能量的探测效率值,用以测定待测放射源的 $\gamma$ 发射率。

### 二 技 术 要 求

1  $\gamma$ 谱仪中电子仪器的不稳定性和非线性应该不明显影响谱仪性能及检定的正常进行。

2  $\gamma$ 谱仪的能量分辨率应好于3 keV(对 $^{60}\text{Co}$ 的1.33 MeV $\gamma$ 射线)。

3  $\gamma$ 谱仪的稳定度对探测效率不确定度贡献小于0.2%。

4 放置放射源位置的一致性要好,轴向位置的不一致性对探测效率不确定度贡献小于0.03%。

5 放射源位置在轴线的垂直方向上的不一致性对探测效率的不注。位置一致性是指标准源的活斑和待测放射源的活斑相对于探测器几何位置的一致性。

确定度贡献小于0.03%。

6  $\gamma$  谱仪应有活时间电路，或采取其他措施进行死时间漏记修正，使死时间漏记效应误差可以忽略。

7  $\gamma$  谱仪有好的抗堆积性能，能保证本规程第20条的要求。

### 三 检定条件

8  $^{152}\text{Eu}$ 点状 $\gamma$ 标准源一个，其活度的总不确定度应好于2% (99.7%置信度)，活度在 $(0.4\sim 4) \times 10^5\text{Bq}$ 之间。

9  $^{152}\text{Eu}$ 标准源必须经过检定，不得使用失效的标准源。

10 标准源的活斑直径小于2mm，活斑应有色斑标记位置，活斑相对于源托外径偏心小于1.5mm。

11  $\gamma$ 射线在活斑中自吸收小于0.1%。

12  $\gamma$ 射线在源承托膜中吸收的不一致性应小于0.1%。

13  $^{152}\text{Eu}$ 标准源中杂质核素 $^{154}\text{Eu}$ 的活度与源中 $^{152}\text{Eu}$ 核素活度相比小于0.2%，并且不含有其他能产生明显的干扰 $\gamma$ 射线的核素。

14 标准源应符合常规要求，有一定的机械和化学稳定性，放射性泄漏和污染应足够小。

15 标准源的源托结构应简单与合理，使待测放射源容易制作，并能使其活斑与标准源活斑在测量时几何位置一致。

注：参考计量技术，1982年2期，40页的制源方法。

16 应保证 $\gamma$ 谱仪对环境温度和湿度的要求，使谱仪具有本规程要求的稳定度。

17 必要时，备交流稳压器一台。

18 备放射源特殊支板，可使放射源在轴向及垂直方向分别做0.5~3mm及1~10mm的位置变动，以便能进行本规程第27条要求的几何位置试验。

19 备检验源一个， $^{137}\text{Cs}$ 或 $^{60}\text{Co}$ 点状 $\gamma$ 源，其活度为 $(2\sim 4) \times 10^5\text{Bq}$ ，用以进行各种 $\gamma$ 谱仪性能试验。

20 为使堆积漏记可以忽略，应选择放射源测量时放置的几何位置及放射源的活度，使堆积漏记小于0.1%。即用标准源进行校准测

量时  $\gamma$  谱总计数率  $r_t$  应满足下式:

$$t_p r_t < 0.001 \quad (1)$$

式中:  $t_p$  ——  $\gamma$  谱仪的堆积分辨时间。

注: 一般的  $\gamma$  谱仪, 当成形时间为  $2\mu\text{s}$  时,  $t_p \approx 10\mu\text{s}$ , 配有堆积抑制器的  $\gamma$  谱仪  $t_p \approx 1\mu\text{s}$ 。

21 使符合相加效应尽量小, 对峰面积引起的不确定度应小于  $0.07\%$ 。

注: 相对全吸收峰探测效率为  $10\%$  的同轴结探测器, 放射源距探头端帽顶面为  $10\text{cm}$  时,  $^{152}\text{Eu}$   $\gamma$  射线峰面积的符合相加修正为  $1\%$  左右, 经修正后, 能达到本条的不确定度要求。如果放射源位置距探头端帽顶面为  $25\text{cm}$  以上, 可以忽视符合相加效应。

#### 四 检定项目和检定方法

##### (一) $\gamma$ 谱仪性能试验

22 按通常方法调试谱仪, 使处于工作状态。

23 能量定度。能量定度是建立谱仪道数与  $\gamma$  射线能量之间的关系。用  $^{152}\text{Eu}$  放射源测得  $\gamma$  谱, 找出主要  $\gamma$  射线及 X 射线(见附录1) 峰位所在道数  $\lambda_i$ ,  $i$  为  $\gamma$  射线或 X 射线的标识号码, 利用各射线的已知能量  $E_i$ , 用多项式拟合实验点  $(\lambda_i, E_i)$ , 得能量对道数的函数  $E(\lambda)$ 。一般  $E(\lambda)$  为二次曲线已足够精确。

24 预热时间和稳定度试验。一开机就以相等的时间收集谱数据, 每次峰面积大于  $3 \times 10^5$  计数。峰面积以  $A_j$  表示, 开始测  $A_j$  的时刻以  $t_j$  表示, 画出  $A_j-t_j$  图线, 找出峰面积进入稳定值的时刻(预热时间)。利用经过预热时间以后取得的峰面积  $A_j$ , ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 求出  $A_j$  的单个测量的标准偏差, 即

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (A_j - \bar{A}_j)^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中:  $\bar{A}_j$  ——  $A_j$  的平均值。

以  $\sigma$  表示峰面积的统计标准偏差,  $\sigma = \sqrt{\bar{A}_j}$ 。则谱仪的稳定度为:

$$\frac{\sigma_s}{A_j} = \frac{1}{A_j} \sqrt{\sigma_A^2 - \sigma^2} \times 100\% \quad (3)$$

谱仪的稳定度应小于0.2%。

25 本底影响试验。峰下康普顿连续谱面积大小的不同会影响对求净峰面积的一致性。这一性能不仅与谱仪的硬件有关，而且与峰的分析方法有关。考验方法是：用 $^{137}\text{Cs}$ 放射源测得 $\gamma$ 射线净峰面积 $A_1$ ，保留所测谱数据，不做清除，移走 $^{137}\text{Cs}$ 放射源，用 $^{60}\text{Co}$ 放射源继续测量，使 $^{137}\text{Cs}$ 峰下本底不断增大，到总峰面积是3倍于 $A_1$ 时，停止收集数据。用求净峰面积 $A_1$ 的同样方法再次求峰面积，得 $A_2$ 。 $A_2$ 与 $A_1$ 相差应在 $\pm 0.3\%$ 之内，相当于由减本底不一致性引起的不确定度为0.1%。

26 堆积漏记试验。如果测量计数率较高，对 $\gamma$ 谱仪的堆积分辨时间大小又难于判断，应做堆积漏记试验。做法是，单独测量 $^{137}\text{Cs}$ 放射源，得峰面积 $A_0$ ，此时应使总计数率足够小，可认为 $A_0$ 无堆积漏记。保持 $^{137}\text{Cs}$ 源不动，再放一个其他放射源，两个源同时被测量，改变第二个源的位置以改变总计数率，取得在不同总计数率下的 $^{137}\text{Cs}$ 源峰面积。一般在一定范围内峰面积对总计数率呈直线关系，用最小二乘法找出堆积损失为0.1%时的总计数率，即允许的总计数率上限。

注：第二个放射源 $\gamma$ 射线多少和能量大小不限，只要对 $^{137}\text{Cs}$ 的 $\gamma$ 射线的峰面积不产生重峰干扰。

27 放射源几何位置试验。当难于判断放射源在测量时放置的几何位置的不一致性对探测效率的影响时，需做放射源几何位置试验。做法是，利用第18条要求准备的放射源支板使放射源在正常位置和轴向离开正常位置0.5、1、…、3mm，测得不同位置上峰面积。作图并观察峰面积与位置偏离值的关系，确定出与正常位置的峰面积相对偏离小于0.1%时允许的几何位置偏离上限。用同样方法确定出轴线的垂直方向上允许的几何位置的偏离上限。

注：(1) 相对全吸收峰探测效率为10%的同轴窄探测器，放射源放置在轴线上距探测器端面顶部10cm以上的位置时，轴向允许几何位置偏离上限为 $\pm 0.95\text{mm}$ 。

- (2) 同上条件, 垂直方向允许几何位置偏离上限为2.5mm。当放射源距端幅10cm以内时, 垂直方向允许几何位置偏离上限为0.5mm。
- (3) 使用DG-1型 $^{152}\text{Eu}$ 点状 $\gamma$ 标准源(中国计量科学研究院有产品)进行效率校准时, 放射源一次正放一次反放, 分别以大致相等的收集时间测量, 将两次测得的峰面积的平均值作为结果数据使用, 便能保证本条对几何位置偏离限的要求。

## (二) 效率校准

28 把 $^{152}\text{Eu}$ 标准源放在拟校准的几何位置上, 收集谱数据, 使峰面积计数统计误差(标准偏差)小于0.2%。若411.1keV $\gamma$ 峰面积大于 $2.5 \times 10^5$ 计数, 所用的其他能量的各 $\gamma$ 射线的峰面积的计数统计误差也能达到要求。

29 对8条 $\gamma$ 射线(244.7keV, 344.28keV, 411.1keV, 444.0keV, 778.9keV, 964.0keV, 1112.1keV及1408.03keV)用经过第25条考验过的峰分析方法求得峰面积。

30 如果所用 $\gamma$ 谱仪没能把待测峰和干扰峰分开, 需进行双峰修正。双峰修正后的峰面积为:

$$A' = A/C_p, \quad (4)$$

式中:  $A$ ——双峰修正前的峰面积;

$C_p$ ——双峰修正因数, 如表1所列。

表1 双峰修正因数 $C_p$ \*

$\gamma$ 射线能量 (keV)	$C_p$	干扰 $\gamma$ 射线能量 (keV)	
		自 $^{152}\text{Eu}$	自 $^{154}\text{Eu}$
244.7	1.005	251.8	248.0
411.1	1.041	416.0	
1112.1	1.012	1109.2	

\* 当干扰 $\gamma$ 峰面积完全包括在峰面积内时, 表中数值才适用, 否则自定。

31 符合相加修正。与待测 $\gamma$ 射线有级联关系的 $\gamma$ 射线, 二者发生符合相加计数时, 会使待测 $\gamma$ 峰面积减少; 与待测 $\gamma$ 射线并联的一组级联 $\gamma$ 射线, 组内诸 $\gamma$ 射线同时符合相加计数时, 使待测 $\gamma$ 射线峰面积增加。附录3给出符合相加的修正公式, 并对 $^{152}\text{Eu}$ 核素 $\gamma$

射线的符合相加修正给出进一步表示。

注：当 $^{152}\text{Eu}$ 放射源距锗探测器端帽25cm以上时，符合相加效应可以忽略，指对于相对全吸收峰探测效率小于10%的 $\gamma$ 谱仪。

32 效率计算及拟合。利用 $^{152}\text{Eu}$ 标准源，经过双峰干扰考虑（第30条）及符合相加修正考虑（第31条），得8条 $\gamma$ 射线的峰面积 $A_j$ ， $j$ 为 $\gamma$ 射线的标识号码。 $\gamma$ 发射率为 $N_{j\gamma} = P_j a$ ， $P_j$ 为第 $j$ 条 $\gamma$ 射线的 $\gamma$ 发射几率， $a$ 为 $^{152}\text{Eu}$ 标准源在进行校准测量时的活度。第 $j$ 条 $\gamma$ 射线的全吸收峰探测效率 $E_{aj} = A_j / N_{j\gamma}$ 。用适当的数学模型，拟合8个校准点 $(E_j, E_{aj})$ 得拟合效率曲线 $E_a(E)$ 。拟合产生的不确定度小于0.2%。表2给出 $^{152}\text{Eu}$ 的 $\gamma$ 发射几率。

表 2  $^{152}\text{Eu}$ 核素 $\gamma$ 发射几率 $P_j$

$\gamma$ 射线	$\gamma$ 射线 能量 $E$ (keV)	$P_j$ ( $\gamma$ /衰变)	$P_j$ 的 不确定度 (%)
$\gamma_4$	244.7	0.0751	0.71
$\gamma_5$	344.28	0.2658	0.68
$\gamma_6$	411.1	0.02234	0.57
$\gamma_7$	444.0	0.03124	0.56
$\gamma_8$	778.9	0.1296	0.53
$\gamma_9$	964.0	0.1462	0.40
$\gamma_{11}$	1112.1	0.1356	0.41
$\gamma_{12}$	1408.03	0.2085	0.40

注：(1) 有很多数学模型可用于拟合。如 $\ln E_a$ 表以 $\ln E$ 的多项式或 $E_a(E) =$

$$\sum_{i=1}^3 b_i \exp(-C_i E)$$

式中， $b_i$ 及 $C_i$ 是待定常数。

- (2) 不宜用函数 $aE^b$ 拟合。
- (3) 如果实用中只需要校准点能量的探测效率值 $E_{aj}$ ，则不需进行效率拟合， $E_{aj}$ 值中也不存在拟合不确定度分量。
- (4) 如果有 $E_{aj}$ 的真值，由8个真值校准点拟合得的拟合效率曲线与真的探测效率曲线之间的差值被理解为拟合误差。
- (5) 由实际校准点拟合得到在校准点能量上的探测效率值，总的来说，由于多点平均效果使精确度比实际校准点效率的精确度高，尽管比实用校准点多引入了拟合不确定度分量。
- (6)  $^{152}\text{Eu}$ 标准源证书上给出的活度常需进行衰变修正才能作为 $a$ 使用。 $^{152}\text{Eu}$ 的半衰期为 $13.1 \pm 0.1$ 年。
- (7) 表中 $P_j$ 数值引自文献Nucl. Instr. and Meth. 168 (1979, 479)

## 五 检定结果处理

33 按本规程检定得 244~1408keV 上全吸收峰探测效率的总不确定度为 (2~3.5)%。如果  $\gamma$  谱仪原有探测效率值与检定结果相差不超出  $\pm(2\sim 3.5)\%$ ，则认为合格，并发给检定证书。

注：(1) 如果没有原有探测效率值，本次检定所做的校准只相当于定度，亦应发给证书。

(2)  $\gamma$  谱仪不便于搬动，检定工作只能在现场进行，由有资格发证单位派人员检查，合格时，可发证书。

## 六 检定周期

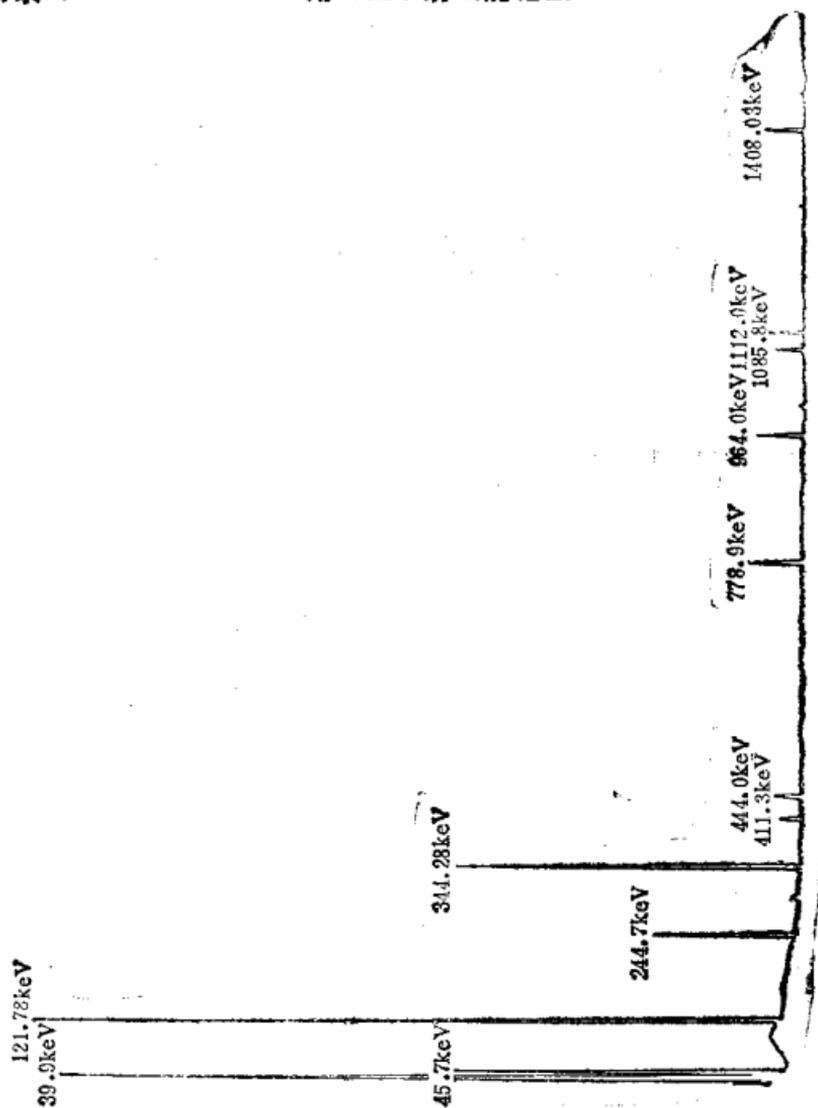
34 对能量定度结果是否保持，可以用检验源每天（或半周）检查一次。

35 对效率校准结果是否保持，可以用  $^{152}\text{Eu}$  或其他点状  $\gamma$  射线标准源每季度或每年检查一次。

36 如果发现问题，或  $\gamma$  谱仪经过修理与更新，认为必要时，需重新按本规程进行校准。

## 附 录

附录 1

铀-152  $\gamma$  射线能谱图

## 附录 2

## 符合相加效应的修正

当探测效率较高时，级联  $\gamma$  射线（或 X 射线）与待测  $\gamma$  射线同时被探测到而符合相加的几率增大；与待测  $\gamma$  射线并联的级联  $\gamma$  射线组中诸  $\gamma$  射线符合相加的几率也增大。前者使待测  $\gamma$  射线峰面积减小，后者使峰面积增大，需进行修正。修正后的峰面积为：

$$A = A' C_0$$

式中：  $A'$  ——修正前的峰面积；  
 $C_0$  ——符合相加修正因子。

$C_0$  由下式确定：

$$C_0 = \frac{1}{\prod_{i=1}^m (1 - E_{T_i} q_i) \times \prod_{j=1}^n \left( 1 + \frac{\prod_{k=1}^l E_{a_{j k}}}{E_{a_0}} q_j \right)} \quad (1)$$

式中：  $i$  ——串联的级联  $\gamma$  射线标志号；  
 $m$  ——串联的级联  $\gamma$  射线数目；  
 $E_{T_i}$  ——第  $i$  个级联  $\gamma$  射线的总探测效率；  
 $q_i$  ——第  $i$  个级联  $\gamma$  射线相对于待测  $\gamma$  射线的份额；  
 $j$  ——并联级联  $\gamma$  射线组的标志号；  
 $n$  ——并联级联  $\gamma$  射线组数目；  
 $k$  ——并联级联  $\gamma$  射线组内各  $\gamma$  射线的标志号；  
 $l$  ——并联级联  $\gamma$  射线组内  $\gamma$  射线的数目；  
 $E_{a_{j k}}$  ——第  $j$  个并联级联  $\gamma$  射线组内第  $k$  条  $\gamma$  射线全吸收峰探测效率；  
 $E_{a_0}$  ——待测  $\gamma$  射线的全吸收峰探测效率；  
 $q_j$  ——第  $j$  个级联  $\gamma$  射线组相对于待测  $\gamma$  射线的份额。

上式中忽略了角关联因子。总效率可以由实验测定。 $q_i$  和  $q_j$  可以从衰变网图计算得到。

$$\text{令 } F_{Li} = E_{Ti} q_i, \quad F_{Gj} = \frac{\prod_{k=1}^i E_{a,jk}}{E_{a0}} q_j \quad \text{式 (1) 变成}$$

$$C_o = \frac{1}{\prod_{i=1}^m (1 - F_{Li}) \times \prod_{j=1}^n (1 + F_{Gj})} \quad (2)$$

下面表中给出了 $^{152}\text{Eu}$  8条主要 $\gamma$ 和X射线的 $F_{Li}$ 和 $F_{Gj}$ 的计算式子。将总效率和峰效率代入分别计算出 $F_{Li}$ 和 $F_{Gj}$ ，然后代入式(2)就得到 $C_o$ 。对于 $\gamma_7(444.0\text{keV})$ ， $C_o$ 由两部分组成，应分别算出每一部分的符合相加修正因子 $C_{o1}$ 和 $C_{o2}$ ，然后由下式算出总的符合相加修正因子：

$$C_o = 0.90C_{o1} + 0.10C_{o2}$$

$^{152}\text{Eu}$  核素的 8 条  $\gamma$  或 X 射线的  $F_{Li}$  和  $F_{GJ}$ .  $E_T(E)$  表示能量为  $E$  的  $\gamma$  或 X 射线的总探测效率,  $E_a(E)$  表示能量为  $E$  的  $\gamma$  射线的全吸收峰探测效率,  $E$  的单位为 keV.

	$\gamma_4$ 244.7keV		$\gamma_7$ 444.0keV
$F_{Li}$	$0.462E_T$ (121.78)		$C_{G1}$ 中包含的 $F_{Li}$
	$0.039E_T$ (444.0)		$0.407E_T$ (1085.8)
	$0.033E_T$ (719.3)		$0.580E_T$ (964.0)
	$0.508E_T$ (867.4)		$0.011E_T$ (719.3)
	$0.033E_T$ (926.3)		$0.268E_T$ (121.78)
	$0.078E_T$ (1005.3)		$0.010E_T$ (244.7)
	$0.012E_T$ (295.9)		$0.765E_T$ (39.9)
	$0.169E_T$ (1212.9)		$0.149E_T$ (45.7)
	$0.887E_T$ (39.9)		$C_{G2}$ 中包含的 $F_{Li}$
	$0.149E_T$ (45.7)		$0.907E_T$ (244.7)
			$0.462E_T$ (121.78)
	$\gamma_5$ 344.28keV		$0.955E_T$ (39.9)
$F_{Li}$	$0.081E_T$ (411.1)		$0.149E_T$ (45.7)
	$0.017E_T$ (586.3)		
	$0.470E_T$ (778.9)		$\gamma_8$ 778.9keV
	$0.060E_T$ (1089.7)	$F_{Li}$	$0.963E_T$ (344.28)
	$0.059E_T$ (1299.1)		$0.028E_T$ (43)
	$0.030E_T$ (367.8)	$F_{GJ}$	$0.065E_a$ (411.1)
	$0.017E_T$ (678.6)		$E_a(367.8)/E_a(778.9)$
	$\gamma_6$ 411.1keV		$\gamma_9$ 964.0keV
$F_{Li}$	$0.963E_T$ (344.28)	$F_{Li}$	$0.462E_T$ (121.78)
	$0.028E_T$ (43)		$0.112E_T$ (444.0)
	$0.377E_T$ (367.8)		$0.019E_T$ (564.0)
	$0.206E_T$ (678.6)		$0.887E_T$ (39.9)

	$0.149E_T$ (45.7)		$\gamma_{12}$ 1408.03keV
$F_{\alpha_j}$	$0.017E_a$ (719.3) •	$F_{L1}$	$0.462E_T$ (121.78)
	$E_a$ (244.7)/ $E_a$ (964.0)		$0.887E_T$ (39.9)
			$0.149E_T$ (45.7)
	$\gamma_{11}$ 1112.1keV	$F_{\alpha_j}$	$0.078E_a$ (444.0) •
$F_{L1}$	$0.462E_T$ (121.78)		$E_a$ (964.0)/ $E_a$ (1408.03)
	$0.024E_T$ (295.9)		$0.016E_a$ (295.9) •
	$0.887E_T$ (39.9)		$E_a$ (1112.1)/ $E_a$ (1408.03)
	$0.149E_T$ (45.7)		$0.016E_a$ (488.7) •
$F_{\alpha_j}$	$0.282E_a$ (867.4) •		$E_a$ (919.4)/ $E_a$ (1408.03)
	$E_a$ (244.7)/ $E_a$ (1112.1)		

附录 3

## 检定证书格式

(正面)

中国计量科学研究院

## 检定证书

\_\_\_\_\_ 字 第 \_\_\_\_\_ 号



计量器具名称 \_\_\_\_\_

型号规格 \_\_\_\_\_

制 造 厂 \_\_\_\_\_

出 厂 编 号 \_\_\_\_\_

设备编号 \_\_\_\_\_

送 检 单 位 \_\_\_\_\_

根据检定结果，准予该计量器具作 \_\_\_\_\_ 使用。

实验室主任 \_\_\_\_\_

核 验 员 \_\_\_\_\_

特派检定员 \_\_\_\_\_

检定日期            年        月        日

有效期至            年        月        日

(反 面)

## 檢 定 结 果

$\gamma$ 射线能量 (keV)	原 拟 合 效 率 $E_{\sigma,1}$	本 次 检 定 结 果 $E_{\sigma,2}$	百 分 差 值 (%)
244.7			
344.28			
411.1			
444.0			
778.9			
964.0			
1112.1			
1408.03			