

在0.3~10MeV能区内Ge(Li)探测器效率的绝对刻度

邢进强 石侠民 沈荣林 伍永顺

(中国科学院原子能研究所)

对42cm³同轴双开端Ge(Li)探测器的效率进行了刻度, γ 射线能量为0.3~10MeV。计算了源-探测器距离为10cm时FEP和DEP的绝对效率曲线,并给出了改变源-探测器距离时效率值的外推计算结果。检验了适合本探测器的FEP和DEP幅度分布的函数形式及效率曲线的函数表达式。

一、引言

大体积同轴Ge(Li)探测器的发展使得它成为核谱学研究的通用工具,而且也广泛地应用于核反应产生的 γ 射线能谱及截面的研究中。在核谱学研究中,一般只需了解在源与探测器相对位置确定的几何条件下,全能峰(FEP)效率随 γ 射线能量的相对变化,在核反应的研究中,不仅要知道FEP和双逃逸峰(DEP)效率随 γ 射线能量的相对变化,而且为了求出反应截面,还应知道效率的绝对值。同时,由于不同的实验条件,源与探测器的距离在不同的实验中是不同的。因此要得到一个可用于不同距离的效率曲线的外推方法。

Ge(Li)探测器绝对效率刻度的方法有多种,本工作选用“双线法”即“对点法”^[1~2],拟合FEP及DEP的经验表达式中的系数。本工作须用一组分支比已确定的级联衰变放射源及核反应源,或选取已经精确测定的多谱线源,得到在较宽能区内的相对效率曲线^[3]。

我们对文献[4]中的Ge(Li)探测器的绝对效率进行了刻度, γ 射线能量为0.3~10MeV。把DEP和FEP效率曲线的经验表达式写为:

$$\ln[\varepsilon(E_\gamma)] = \sum_{i=1}^n a_i x^i \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(E_\gamma)$ 为效率值, $x = \ln\left(\frac{0.511}{E_\gamma}\right)$ 。

“双线法”可定出 $a_1 \cdots a_n$ 。选用一组标准源定出 a_0 值,即可得FEP的绝对效率曲线。DEP的绝对效率曲线是用FEP的绝对效率值来归一的。

在文献[5]中报导了大体积同轴Ge(Li)探测器的FEP相对效率对数与能量对数关系在直线部分的斜率随源与探测器的距离变化而变化,在距离小于10cm内变化显著(约20%),当大于20cm后斜率基本不变。在核反应研究中,这一距离是要改变的,但效率刻度一般只在少数几个距离上进行。为了能合理地外推,我们引入“等效中心”的概念,并从实验上求出了这一数值^[6]。

我们还检验了对这一探测器合适的FEP、DEP幅度分布的函数形式,使它既有明确的物理意义,计算方便,而又可以得到较高的解谱精度。

二、实验测量

本工作刻度的Ge(Li)探测器晶体的直径约38mm, P芯直径约10mm, n层厚度约1.4mm。它对⁶⁰Co源的1.332MeV γ 射线的能量分辨率为3keV。在0.8~3.6MeV能区内积分非线性好于0.05%,在12MeV以下为0.1%。24小时连续工作峰位变化 $\leq 0.1\%$ 。

本工作选用的放射源及(p, γ)共振反应列于表1,除级联辐射外,多谱线放射源的各谱线强度比有许多测量工作,其结果互有差异,以⁵⁶Co为例,个别我们感兴趣的谱线的歧离可达10%。我们采用文献[7]对各家工作的编评结果。²³Na(p, γ)的几个共振给出了有确定分支比的级联 γ 谱线,但这些谱线不均匀,用²⁷Al(p, γ)($E_p=992$ keV)共振来补充。作为Ge(Li)探测器相对效率刻度的次级标准,该反应取代了过去用的(n, γ)反应,我们取文献[8]的相对强度,因它给出的1778.9keV谱线的强度误差较小,因而强度比的误差也较小。

刻度探测器的绝对效率选用的一组标准源列于表2。

把源制成溶液滴在滤纸上,在红外灯下烘干,平放入直径为8mm、底部厚为0.5mm的聚氯乙烯小盒中。

表1 γ 射线能量、强度比、探测器效率比值的实验值与“双线法”拟合的结果(表中能量以 E_0 的 γ 射线强度为100)

放射源	$E_0(\text{MeV})$	$E_i(\text{MeV})$	I_i	$(\varepsilon_0/\varepsilon_i)$ 实	$(\varepsilon_0/\varepsilon_i)$ 拟
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	0.658	0.447	3.82 ± 0.03	0.61 ± 0.02	0.63
		0.707	17.55 ± 0.14	1.10 ± 0.02	1.09
		0.763	23.60 ± 0.19	1.18 ± 0.02	1.19
		0.884	77.50 ± 0.57	1.38 ± 0.02	1.40
		0.937	36.30 ± 0.27	1.52 ± 0.03	1.55
		1.384	26.39 ± 0.20	2.17 ± 0.03	2.20
		1.505	14.19 ± 0.11	2.35 ± 0.04	2.39
^{60}Co	0.847	0.977	1.43 ± 0.01	1.14 ± 0.03	1.17
		1.038	13.81 ± 0.06	1.27 ± 0.03	1.24
		1.238	67.18 ± 0.28	1.49 ± 0.02	1.50
		1.360	4.28 ± 0.02	1.68 ± 0.05	1.63
		1.771	15.67 ± 0.09	2.19 ± 0.03	2.22
		2.035	7.87 ± 0.05	2.30 ± 0.07	2.37
		2.598	16.94 ± 0.10	3.02 ± 0.10	2.97
		3.253	7.43 ± 0.05	3.64 ± 0.15	3.74
^{182}Ta	1.121	0.179	8.64 ± 0.07	0.16 ± 0.01	0.15
		1.221	77.88 ± 0.40	1.07 ± 0.02	1.09
		1.230	32.87 ± 0.12	1.12 ± 0.02	1.10
		1.257	4.29 ± 0.03	1.15 ± 0.02	1.13
$^{27}\text{Al}(p, \gamma)(E_p=992\text{keV})$	1.779	2.839	5.8 ± 0.4	1.74 ± 0.12	1.67
		4.498	5.1 ± 0.3	3.21 ± 0.22	3.17
		4.744	9.3 ± 0.5	3.83 ± 0.25	3.59
		6.020	6.3 ± 0.5	5.94 ± 0.48	5.78
		10.763	80.8 ± 1.5	29.47 ± 0.82	30.12
$^{27}\text{Al}(p, \gamma)(E_p=1317\text{keV})$	4.496	6.577	110 ± 5	2.23 ± 0.09	2.16
$^{23}\text{Na}(p, \gamma)(E_p=1318\text{keV})$	1.369	11.588	100	54.25 ± 3.26	51.02
$^{23}\text{Na}(p, \gamma)(E_p=1394\text{keV})$	3.866	7.795	100	4.21 ± 0.13	4.27
$^{23}\text{Na}(p, \gamma)(E_p=1417\text{keV})$	2.754	8.920	100	9.65 ± 0.37	10.01

表2 薄膜标准源

源名称	^{203}Hg	^{113}Sn	^{85}Sr	^{137}Cs	^{54}Mn	^{65}Zn
$E_\gamma(\text{keV})$	279.2	391.7	514.0	661.5	834.8	1115.5
$I(\times 10^4/\text{S}/4\pi)$	$3.458 \pm 1.9\%$	$4.501 \pm 1.7\%$	$4.852 \pm 1.9\%$	$3.359 \pm 1.5\%$	$4.822 \pm 1.5\%$	$4.178 \pm 1.5\%$

在数据处理中,计算了0.5mm厚的底衬对不同能量 γ 射线的吸收。带源的聚氯乙烯小盒固定在一垂直于探测器中心轴线的可沿探测器中心轴线移动的圆盘中心上,源与探测器外壳表面的距离读数准确到0.5mm。在实验中,对距离为3、5、10、15、20和25cm六个位置上刻度了探测器的效率值。

$^{27}\text{Al}(p, \gamma)$ 、 $^{23}\text{Na}(p, \gamma)$ 共振反应的测量在静电加速器上进行。金属铝靶用真空蒸发到0.3mm厚、直径为14mm的Ta底衬上。对 $E_p=992\text{keV}$ 的质子铝膜厚度约为5keV。金属钠性质活泼,为减慢其氧化,防止钠靶的脱落,在钠的表面复盖一层金膜。对 $E_p=1318\text{keV}$ 的质子,钠膜厚约11keV。对我们所取的共振,它们皆属厚靶。实验中质子束平均流强为 $2\mu\text{A}$,能散为1keV。测量时源与探测器距离固定在10cm上,探测器中心轴线与质子束成 55° 角,这样可以不必对文献上给出的强度比作角分布各向异性修正。

薄膜标准源放在与多谱线源同一圆盘的中心,在源与探测器相距10cm处作绝对刻度,得到在10cm处 $E_\gamma=$

0.3~10MeV 的 FEP 及 DEP 的绝对效率曲线, 在其它距离上的效率曲线均可由该曲线结合等效中心测量结果外推得到。

三、峰面积的确定

在 γ 射线的测量中必须准确地定出 FEP 和 DEP 的面积, 即计数 N_i 。一般采用函数拟合法确定 FEP 及 DEP 的一些特征量。我们选择函数表达式的原则是在保证有合理拟合优度下尽量选择参数少的形式。本工作对 γ 谱是分段描述的。

当 $I < P_5 - P_6 P_7$ 时

$$F(I, \vec{P}) = P_1 + P_2(I - P_5) + P_3(I - P_5)^2 + P_4 \exp[P_7 / (2P_6^2) (2I - 2P_5 - P_6 P_7)] \quad (2)$$

当 $I > P_5 - P_6 P_7$ 时

$$F(I, \vec{P}) = P_1 + P_2(I - P_5) + P_3(I - P_5)^2 + P_4 \exp[-1 / (2P_6^2) (I - P_5)^2] \quad (3)$$

式中, I 为多道道数; P_1 、 P_2 、 P_3 为二次多项式的本底参数; P_4 为高斯高度; P_5 为峰位; P_6 为高斯宽度; $P_6 P_7$ 为高斯函数与指数函数的连接点。

DEP 的函数形式如下:

$$F(I, \vec{P}) = P_1 + P_2(I - P_5) + P_3(I - P_5)^2 + P_7 / [1 + \exp(-3(I - P_5) / P_6)] + P_4 \exp[-(1/2P_6^2) (I - P_5)^2] \quad (4)$$

式中, P_7 表示卷积函数的高度。

用高斯-牛顿法求出各物理量。

为检验公式 (2)、(3) 的适用性, 分别对 ^{60}Co 源和 ^{56}Co 源的 FEP 作了检验, 见图 1。

图中 (A)(C) 表示用纯高斯函数描述, 拟合优度差, 低能端与实验点有较大的歧离。(B)(D) 表示用分段函数描述的结果, 其拟合优度有明显地改进。

用函数拟合求出的峰面积误差随计数的多少而异, 在我们的实验中, 一般取计数 3000~10000, 统计误差约 1~2%。由于 Ge(Li) 本身的效率很低, 所以由级联谱线合峰效应带来的误差很小, 估计不大于 0.1%, 本工作不作修正。

四、实验结果

FEP 及 DEP 的效率随 γ 射线的能量变化为一平滑曲线, 因此可用一幂级数作半经验地拟合, 如公式 (1) 所示。由实验求出

$$e_2/e_1 = N_2/N_1 \cdot I_1/I_2 \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (1) 式

$$\ln(e_2/e_1) = \ln(N_2/N_1 \cdot I_1/I_2) = \sum_{i=1}^n a_i (x_2^i - x_1^i) \quad (6)$$

将若干对谱线的面积、相对强度代入 (6) 式定出 $a_1, \dots, a_n$ 。我们对 $n=2, 3, 4, 5$ 及 6 五种情况分别作了计算, 在 $E_\gamma=0.3\sim 3.5\text{MeV}$ 范围内以 $n=4$ 为宜, 拟合优度最佳。我们也结合 (p, γ) 反应的测量数据, 在 0.3~10MeV 能区内作了 $n=4$ 的幂级数拟合。拟合效率比值见表 1, 与实验值在误差范围内一致。

用表 2 所列六个薄膜标准源定出六个 a_0 值, 最后 a_0 取六个 a_0 的平均值。

源与探测器距离为 10cm, FEP 的绝对效率及通过与 FEP 相对应的峰面积比值及由 FEP 的效率绝对值求出的 DEP 的绝对效率如图 2 所示。

在 $E_\gamma < 0.5\text{MeV}$ 能区内, FEP 效率误差约 2%; $E_\gamma \leq 2\text{MeV}$ 时约 3%; 当 $E_\gamma \leq 10\text{MeV}$ 时约 8%; $E_\gamma=2\sim 10\text{MeV}$ 能区内 DEP 效率误差约 10%。由于 DEP 的效率是由 FEP 的效率换算出, 其绝对效率的误差也相应地增加, 但其效率的相对误差略小, 表 3 列出了 DEP 效率比的实验值与拟合值的比较。

我们用 ^{22}Na 、 ^{46}Sc 、 ^{182}Ta 、 ^{110m}Ag 和 ^{56}Co 这组放射源测定了六个距离的相对效率曲线, 并用标准 ^{137}Cs 及

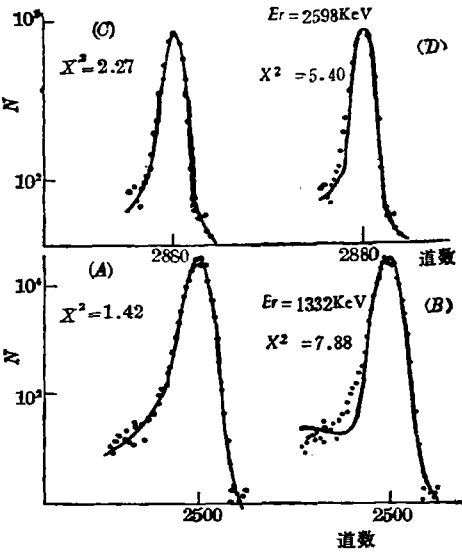


图 1 对 FEP 函数拟合形式的检验

* 实验点 — 拟合曲线 A、B 是 ^{60}Co 源 C、D 是 ^{56}Co 源

^{65}Zn 对除 10cm 外的各条曲线绝对化。取 (1) 式中的 $n=2$ 作出 $\ln \varepsilon \sim \ln E_\gamma$ 曲线, 结果列于表 4。表中 a_2 为一不规则变化的少量, 曲线形状主要由 a_0 和 a_1 决定, 斜率 a_1 在 $R < 15\text{cm}$ 时变化较大, 在大于 15cm 后变化相对平缓。

将 $\text{Ge}(\text{Li})$ 探测器看为点探测器, 对不同 γ 射线能量点探测器与探测器外表面的距离用“等效中心” $r(E_\gamma)$ 表示, 按定义:

$$\varepsilon(E_\gamma) = K/[R + r(E_\gamma)]^2, [\varepsilon(E_\gamma)]^{-1/2} = \frac{r(E_\gamma)}{\sqrt{K}} + \frac{R}{\sqrt{K}},$$

用不同的 R 与 $\varepsilon(E_\gamma)$ 值求出 $r(E_\gamma)$, 其误差为 $\pm 0.08\text{cm}$, 主要来自 R 及 $\varepsilon(E_\gamma)$ 的误差, 结果列于表 5。由表 5 可见, 在 $E_\gamma < 500\text{keV}$ 时 $r(E_\gamma)$ 变化较大, 在 $E_\gamma > 1\text{MeV}$ 后 $r(E_\gamma)$ 在误差范围内不变, 这反映了随 E_γ 增大 $r(E_\gamma)$ 趋于固定值的物理推断。为了便于内插和外推, 选取了 $\frac{1}{r(E_\gamma)} = a + \frac{b}{E_\gamma}$ 的经验表达式。

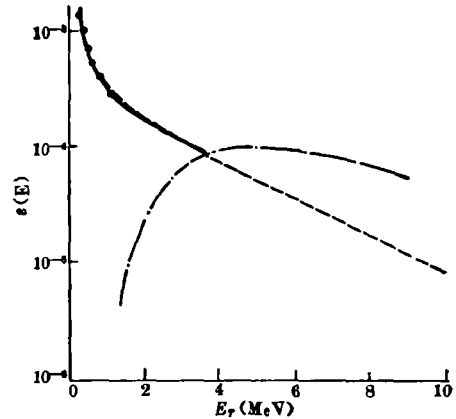


图 2 $E_\gamma = 0.3 \sim 10\text{MeV}$ FEP 及 DEP 效率曲线

--- FEP ···· DEP

表 3 DEP 效率比的实验值与拟合值的比较

放射源	E_0 (MeV)	E_i (MeV)	$(\varepsilon_i/\varepsilon_0)$ 实	$(\varepsilon_i/\varepsilon_0)$ 拟
$^{27}\text{Al}(p, \gamma) E_p = 992\text{keV}$	1.779	2.839	4.05 ± 0.28	3.77
		4.498	5.92 ± 0.43	5.14
		4.608	6.62 ± 0.34	6.18
		4.744	6.34 ± 0.32	6.19
		6.020	6.16 ± 0.49	5.72
		10.763	3.23 ± 0.10	3.29
$^{27}\text{Al}(p, \gamma) E_p = 1317\text{keV}$	4.496	6.577	1.14 ± 0.04	1.12
$^{23}\text{Na}(p, \gamma) E_p = 1394\text{keV}$	3.866	7.759	0.78 ± 0.02	0.80
$^{23}\text{Na}(p, \gamma) E_p = 1318\text{keV}$	1.369	11.588	8.70 ± 0.26	8.65
$^{23}\text{Na}(p, \gamma) E_p = 1417\text{keV}$	2.754	8.920	1.17 ± 0.08	1.15

表 4 $\ln \varepsilon \sim \ln E_\gamma$ 斜率变化趋势

a_i \ $R(\text{cm})$	3	5	10	15	20	25
a_0	-5.9429	-6.4118	-7.2919	-7.9509	-8.3619	-8.7509
a_1	1.1310	1.0693	1.0852	1.0760	1.0763	1.0730
a_2	0.0353	0.0042	0.0606	0.0379	0.0085	0.0023

表 5 等效中心的内插值与实验值

E_γ (MeV)	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0
r_d (cm)	3.67 ± 0.10	3.96 ± 0.10	4.12 ± 0.10	4.13 ± 0.10	4.19 ± 0.10	4.19 ± 0.10	4.18 ± 0.10	4.17 ± 0.10	4.18 ± 0.10
r_f (cm)	3.73	3.90	4.05	4.08	4.13	4.16	4.18	4.21	4.22

r_d 为实验测定值 r_f 为经验公式拟合值

由一组 r_d 值定出式中的常数 a 和 b , 各个 E_γ 相应的 $r(E_\gamma)$ 可得。为与实验值比较, 将拟合值 (r_f) 列于表 6。

利用该探测器在不同距离上测量了一些中重元素及重元素的 14MeV 快中子与核非弹性作用产生的分立 γ 谱线的截面。

参 考 文 献

- [1] C. Vanderleun et al., Nucl. Phys., A100, 316 (1967).
- [2] W. R. Kane and M. A. Mariscotti, Nucl. Instr. Meth., 56, 189 (1967).

(下转第 43 页)

下运行亦能有较长的使用寿命(见表6)。

表6 F₄₆ 阳膜在实验室食盐电解槽中的运行结果

膜 型	运行情况				使用时间	备 注
	电压 (V)	电流密度 (A/dm ²)	含Cl 量*(ppm)	电流效率 (%)		
非交联	4.5~5	10	未测	~80	90h 后膜上交换基团基本脱落	F ₄₆ -St
交 联	4.5~5	10	<100	>85	520h后膜性能不变	**F ₄₆ -St-DVB

*产品碱中含 Cl 量, **单体用料比St:DVB=85:15

上述一系列气相接枝共聚试验均表明, 制备 200×400mm² 的 F₄₆ 气相接枝膜所耗接枝单体仅 40ml 左右 (约为液相接枝法用量的十分之一), 而且其接枝膜表面的均聚物极少 (接枝膜未经苯洗的接枝率为 28.6%, 经热苯洗至恒重为 26.7%), 可望在今后的实际使用中可将节约大量的单体和洗涤溶剂。

目前, 我们在实验室的反应装置中已能获得 200×400mm² 均匀平整的接枝膜。说明该气相接枝法确有深入研究的价值和扩大试验的前景。

四、结 论

1. 采用单体回流气相接枝法进行了预辐照 F₄₆ 薄膜与苯乙烯-二乙烯基苯体系接枝共聚的研究, 并制得了优质的 F₄₆ 均相离子交换膜。
2. 研究结果表明, 预辐照 F₄₆ 薄膜-St 体系的气相接枝转化过程是一个接枝层由表及里逐层推进的过程。
3. 交联型 F₄₆-St-DVB 接枝膜和非交联型 F₄₆-St 接枝膜在苯中的溶胀率试验及温度-形变曲线测定可反映出两者结构上的差异。所制得的交联型、非交联型 F₄₆ 离子交换膜性能皆优, 可供有关方面研究试验之用。
4. 单体回流气相接枝法是一种反应周期较短、装置简单很有实用价值的气相接枝新方法。

参 考 文 献

- [1] 许志立等, 1979 年上海市原子核科学技术学会年会资料。
- [2] 许志立, 科技动态简报(中国科学院上海原子核研究所图情室), 1, 1(1980)。
- [3] Б.Л.Цетлин и др., Радиационная химия полимеров, 1966, с. 131.
- [4] А.В.Власов и др., Радиационная химия полимеров, 1966, с. 139.
- [5] Х.У.Усманов и др., Радиационная химия полимеров, 1966, с. 153.
- [6] Bunzo, Eda et al., J. Polym. Sci.. A 8, 1831 (1970).
- [7] J. Dobo and P. Hedvig, J. Polym. Sci. part c, 16, 2577 (1967).
- [8] 上海原子核研究所, 海水淡化, 2, 14(1977)。
- [9] М. Т. Рыжов и др., Пласт. Массы, 2, 68 (1976).

(1982 年 6 月 8 日收到)

(上接第 26 页)

- [3] B. P. Singh and H. C. Evans, Nucl. Instr. Meth., 97, 475 (1971).
- [4] 沈荣林等, 原子核物理, 4, 59(1982)。
- [5] P. M. Grant, Nucl. Instr. Meth., 127, 371 (1975).
- [6] J. B. Marion and J. L. Fowler, Fast neutron physics, Part I, London, 1960, p.365.
- [7] V. Hnatowicz, Nucl. Instr. Meth., 161, 151 (1979).
- [8] A. Anttila et al., Nucl. Instr. Meth., 147, 501 (1977).

(1982 年 4 月 5 日收到)

tant role in the experiments of nuclear physics. Since the invention of the Ge(Li) detector, which has an excellent energy resolution and larger volume, the coincidence methods have greatly been improved. As the Ge(Li) detector has larger capacitance and small pulse-height and various rise time of pulse, its timing seems more difficult.

A Ge(Li)-Ge(Li) list mode multiparameter system with the Scorpio-3000 multichannel computer system and two large Ge(Li) detectors (one is 130 cm³, the other 100 cm³) has been set up and adjusted.

The system is capable of processing 1000 events/s and E-E-T analysis in 4096 × 4096 × 1024 channels. The play back sorting of a 2500 feet magnetic tape is completed in 90 minutes, and the work can be done with the same computer on the spot. The time resolution is 30 ns at 1.33 MeV γ ray and true/false coincidence ratio is 65:1.

An angular correlation system for hyperfine interaction studies

Shen Weiqi Dong Mingli

(Institute of Atomic Energy, Academia Sinica)

In recent years, the study of more complicated hyperfine interactions, such as impurity-defect interaction in condensed matter, is rather interested. The partial amplitudes of some kind of specific perturbations are quite small as compared to the total. The exact extraction of them is difficult and depends critically on the characteristics of the spectrometer, e.g. differential linearity and time resolution.

A rotational triple detector system has been built for both in-beam and off-beam experiments.

The differential-nonlinearity in spectra is minimized through rotating the common start counter by 90° in successive measurement.

Some special electronic treatment has been taken and the total time resolution of the fast-slow circuit proves to be better than 1.5ns.

The determination of the absolute efficiency of a coaxial Ge(Li) detector in the energy region from 0.3MeV to 10MeV

Xing Jinqiang Shi Xiamin
Shen Ronglin Wu Yongshun

(Institute of Atomic Energy, Academia Sinica)

The absolute efficiency of a 42cm³ coaxial Ge(Li) detector was measured in the energy region of 0.3MeV ~ 10MeV.

The absolute efficiency curves of FEP and DEP at the source to detector distance of 10cm were calculated. Extrapolating this method and result to different source-detector distances were demonstrated. The functions of fitting the FEP and DEP curves and the expressions of FEP and DEP efficiency curves suited to this detector were checked.