

目 录

β - γ 和中子测量仪的能量响应	(1)
核脉冲分析用的高分辨率线性放大器	(30)
适于脉冲幅度分析的快速模拟-数字变换器	(50)
半导体 γ 射线探测器	(80)
离子注入高纯锗探测器	(115)
测量水中氚的探测器	(128)
用高纯 GaAs 制成的 GaAs 面垒型探测器的性能	(134)
用 Li^6 半导体夹层谱仪测量快中子谱	(156)
PuF_6 用压力计的试制	(179)
用于辐射探测器的化合物半导体进展简评	(188)
核探测器用的 CdTe 制备进展	(206)

β - γ 和中子测量仪的能量响应

汤普森(I. M. G. Thompson)[†] 等

文中给出了 29 台 γ 测量仪和 5 台中子测量仪的能量响应 (光子能量范围是 29 千电子伏至 6 兆电子伏, 中子能量范围是 0.05 电子伏至 19 兆电子伏), 还详细给出了辐射源和用于能量响应评价的辐射场的标定。

一、引言

能量响应是评价保健物理监测仪测量可靠性的一个重要因素。要确定每一台仪器的能量响应, 特别是对用几百台仪器的单位来说, 显然是做不到的。因此, 对于某一种设计的仪器只能确定一台仪器的能量响应, 并且假定按同样设计制造的仪器都有相同的能量响应。这个假定可以通过抽样测量来核对。

确定了 γ 仪器在 29 千电子伏至 6 兆电子伏的能量响应, 中子仪器在 0.05 电子伏至 19 兆电子伏的能量响应。

克拉克 (Clarke) 等人^[1]1967 年介绍过英国中央电业管理局 (CEGB) 所属核电站使用的剂量计标定工作头两年的经验。本文发展了这些经验, 特别是能量响应测定部分。

二、 γ 监测仪

1. 辐射源和辐射场的标定

对于三个能量范围, 采用了三种辐射源。29—208 千电子伏

[†] 英国伯克利核实验室。

用重过滤 X 辐射源, 208 千电子伏—1.25 兆电子伏用密封同位素源, 6 兆电子伏用加速器。

(1) 重过滤 X 辐射源 为了提供一组狭窄的 X 射线能谱, 使用了一台恒定电压的 TF 1555 B/1 型马科尼 (Marconi) X 射线装置(准直束中有重过滤片)。表 1 是早期测定中用的过滤片和工作条件^[2], 后来换了 X 射线管, 加了一个伏特计测量管电压, 并重新

表 1 X 射线装置修改前的工作条件

管电流与相应的外加电压			过 滤 片				半吸收层,	有效能量,
15毫安, 千伏	1.0毫安, 千伏	0.25毫安, 千伏	铅, 毫米	锡, 毫米	铜, 毫米	铝, 毫米	毫米	千电子伏
38	40	38	—	—	0.25	1.0	2.42 铝	29
56	56	52	—	—	1.0	1.0	0.245 铜	46
74	72	68	—	—	2.5	1.0	0.49 铜	59
102	98	94	—	2.0	0.53	1.0	1.27 铜	87
150	142	138	1.0	2.0	0.53	1.0	2.55 铜	118
180	170	166	2.0	2.0	0.53	1.0	3.65 铜	147
218	204	198	3.5	2.0	0.53	1.0	5.0 铜	188
250	234	230	5.5	2.0	0.53	1.0	5.45 铜	208

表 2 修改过的 X 射线装置的工作条件和能谱测定的结果

附 加 的 过 滤 器 (与原来的不同), 毫米				管电压	哈威尔原子能 中心的测定		伯克利核实验室 的测定	
铅	锡	铜	铝	(KV ₀) [*]	平均能量, 千电子伏	宽 度, 千电子伏	有效能量, 千电子伏	半吸收层, 毫米
—	—	0.25	1.0	32	29	4	29	2.23 铝
—	—	1.0	1.0	53	46	8	46	0.245 铜
—	—	2.5	1.0	67	59	12	59	0.49 铜
—	2.0	0.53	1.0	97	85	16	87	1.33 铜
—	4.0	1.05	1.0	129	111	21	110	2.23 铜
2.0	3.0	0.53	1.0	171	152	22	154	3.90 铜
3.5	2.0	0.53	1.0	203	181	28	188	4.95 铜
5.5	2.0	0.53	1.0	224	203	29	209	5.54 铜

* KV₀: 千伏恒定电位⁽⁴⁾。

刻度过 X 射线装置。为了测定能谱,改变了两个过滤片的组合^[3]。目前使用的过滤片和工作条件示于表 2。

表 2 的管电压 (KV_{cp} = 千伏恒定电压^[4]) 是管伏特计上的电压读数。当管电流为 40 微安—15 毫安时, 为了使装置与任何特定过滤片配合都能给出准确的能谱, 可改变装置的外加电压直到伏特计读出适合于该组合的 KV_{cp} 为止。

γ 仪在 29—210 千电子伏范围内的灵敏度, 是通过它 (在表 1 和表 2 中给出的能量范围) 跟 33 G 型振簧 (Vibron) 静电计加 35 厘米³ Baldswin Tufnol 电离室的比较而确定的。先使 X 射线装置在一种标准条件下工作, 用 35 厘米³ Tufnol 电离室测量离管焦斑一定处的辐照水平; 测量时用一个位于准直系统中的监督电离室检查过滤束。然后保持工作条件不变, 通过远距离操作, 用 γ 仪取代 35 厘米³ Tufnol 电离室。操作中要保持仪器中心点和标准电离室离焦斑同样远。35 厘米³ Tufnol 电离室不能直接在国立物理实验室按初级标准自由空气电离室刻度。因为国立物理实验室的 X 射线束比我们的能谱分布宽和辐照率高。为此将一台连着较低灵敏度线路的电离室——Baldswin-Farmer Sub-standard Dosimeter MK. II 在国立物理实验室进行刻度, 然后同连着静电计的电离室在重过滤束中比较, 辐照时间长达一小时。

(2) 密封同位素源 在 0.25—1.25 兆电子伏范围内, 使用密封同位素源。最常用的源是 Au^{198} (0.412 兆电子伏)、 Cs^{137} (0.66 兆电子伏)、 Ra^{226} (平均 0.8 兆电子伏) 和 Co^{60} (平均 1.25 兆电子伏)。当刻度仪器时, 源和仪器应放在相对“无散射”的由铝和 Perspex 构成的支架上。应当小心, 使仪器和源远离地面, 这样就能忽略地板的散射, 只考虑源到探测器的距离就行了。

由于很精确地刻度了 Ra^{226} 源和很仔细地测定了它的 γ 发射常数, 并能忽略其衰变校正, 因此, 所有 γ 能量响应曲线都对 Ra^{226} 辐射作过归一化。虽然 Ra^{226} 能谱复杂, 还是假定其平均能量为 0.8 兆电子伏。在许多情况下, 这使 0.66—1.25 兆电子伏区间

表 3 试验过的 β - γ

类 型	厂 家	探 测 器
N555	Ekco	离子电离室
N596	Ekco	离子电离室
1452A	Ekco	离子电离室
1657A	Avo	离子电离室
1852A	Avo	离子电离室
740A	Victoreen	离子电离室
AGB-10KG-SR	Victoreen	离子电离室
TF1229/1	Marconi	离子电离室
1368A	Bendix-Ericsson	盖革-弥勒计数管 (4个可去掉的)
Teletector 6112	Total	盖革-弥勒计数管 (2个可去掉的)
1413A	IDL (Nuclear Enterprises)	闪烁体
1597A	General Radiological	闪烁体
N1S295B	Allscott	闪烁体
BNL1(MK. 1)	Ekco	闪烁体
N1S322	Pitman	闪烁体
Radiac № 2 测量计	Ekco	离子电离室
Tol/D	Berthold/Frieseke	离子电离室
440	Victoreen	离子电离室
X-50	Telsec Graetz	盖革-弥勒计数管
CP-TP-1A	Technical Associates	离子电离室
2601	Nuclear Enterprises	盖革-弥勒计数管
2602	Nuclear Enterprises	盖革-弥勒计数管
固定式监测器 8003	Elliott	高压离子电离室
0030	Nuclear Enterprises	离子电离室
Doserate Meter 6150	Total	盖革-弥勒计数管
RD 8	Wallac Oy	盖革-弥勒计数管 (2个可去掉的)
XL 1000	Phillips	离子电离室
Atometer 6122	Total	盖革-弥勒计数管
Radector 111	Victoreen	离子电离室

仪器的说明

辐照范围	仪器量程或标度	注 解	参看图
0—1.5 伦·小时 ⁻¹	3 个线性量程	β - γ	图 1
0—300 毫拉德·小时 ⁻¹	3 个线性量程		图 2
0—150 伦·小时 ⁻¹	3 个线性量程		图 3
0—100 伦·小时 ⁻¹	对数标度		图 4
0—5000 伦·小时 ⁻¹	对数标度		图 5
0—5 伦·小时 ⁻¹	3 个线性量程		图 6
0—10000 伦·小时 ⁻¹	3 个对数量程		图 7
0—50 毫伦·小时 ⁻¹	对数标度	固定式监测器	图 8
0—25 毫伦·小时 ⁻¹	5 个线性量程		图 9
0—1000 伦·小时 ⁻¹	5 个量程	β 指示仅在第三量程上	图10
0—1.5 毫伦·小时 ⁻¹	4 个线性量程		图11
0—3 毫伦·小时 ⁻¹	3 个线性量程		图12
0—500 毫伦·小时 ⁻¹	对数标度		图13
0—3 伦·小时 ⁻¹	6 个线性量程		图14
0—1000 计数/秒	3 个十进位准对数		图15
		选择性 γ 监测器	
0—300 伦·小时 ⁻¹	3 个线性量程	可用外部探头	图16
0—100 毫伦·小时 ⁻¹	6 个量程		图17
0—300 毫伦·小时 ⁻¹	5 个线性量程		图18
0—50 伦·小时 ⁻¹	4 个量程		图19
0—50 伦·小时 ⁻¹	3 个线性量程		图20
0—10 毫伦·小时 ⁻¹	对数标度		图21
50 微伦·小时 ⁻¹ 至 200 毫伦·小时 ⁻¹	对数标度		图22
0.1 毫雷姆·小时 ⁻¹ 至 10 雷姆·小时 ⁻¹	对数标度	固定式监测器	图23
0—4 伦·小时 ⁻¹	4 个线性量程	有除 2 装置 { 外部盖革计数器 内部盖革计数器(也有低水平的外部盖革-弥勒计数管) 有能量补偿的盖革计数器	图24
0—500 伦·小时 ⁻¹ }	1 个量程		图25
0—50 伦·小时 ⁻¹ }	5 个量程		
0—300 伦·小时 ⁻¹	2 个量程		图26
0—300 毫伦·小时 ⁻¹	3 个量程		图27
0—15 伦·小时 ⁻¹	2 个量程		图28
0—1000 伦·小时 ⁻¹	3 个对数量程		图29

有平滑的能量响应曲线。但是，在一些仪器中，得不到平滑曲线，这可能是 Ra^{226} 衰变产物的高能或低能光子改变了仪器的响应。

(3) 6 兆电子伏 γ 源 许多反应堆产生大量的 6 兆电子伏 γ 辐射。在气冷堆中， γ 来自 O^{16} 激发态，而 O^{16} 激发态是快中子被 CO_2 冷却气体中的 O^{16} 俘获，发生 N^{16} β 衰变，变成 O^{16*} 。显然，希望测量该辐射的仪器应对该辐射能量有响应。335 千电子伏 $\text{F}^{19}(\text{p}, \alpha\gamma)\text{O}^{16}$ 共振反应是这种测量的合适源；虽然这个反应的产额低（探测器距源 30 厘米处约为 40 毫伦/小时），但是除了高水平的仪器外都可以测量了。目前对该能量的响应测定准确度不优于 $\pm 20\%$ 。因此还需要对辐射场标定进行大量的研究工作。加速器的辐射场是非准直的，次级电子太多。这就说明离子电离室仪器的响应要大于 1（虽然其室壁厚度远小于 6 兆电子伏电子平衡所需要的“经典”厚度，即 3 克/厘米²）。幸而许多气冷堆附近的 6 兆电子伏辐射场实际上也是非准直的；初级辐射到达测量点前必须通过大量的物质；因而用加速器进行测量可以充分表征仪器在 6 兆电子伏处的工作性能。加速器辐射的标定是通过对固定立体角内的 α 计数来实现的，并且用国立物理实验室在 2 兆伏处刻度过的电离室来核对。

2. 试验过的 γ 测量仪的说明

表 3 是仪器的试验结果。考虑到几何条件的重要性，所以能量响应都是在待用的几何条件下测定的。响应曲线中有几何条件的说明。测量前应事先作电气性能试验，以保证仪器良好地工作。测量前后，仪器的准确度用 Ra^{226} 源校准，因此能量响应曲线可以对 0.8 兆电子伏归一化。凡备有“端帽”(end cap)的仪器，其响应曲线都是在相应位置上加上或不加上这个“端帽”时测得的。

三、中子监测仪

1. 辐射源的详情和辐射场的标定

利用了一些密封中子源(γ, n 和 α, n) 以及加速器产生的几个反应。

密封源的产额、半衰期和平均能量示于表 4。所有这些源的产额是用硫酸锰浴技术测定的(误差小于 $\pm 2\%$)。该技术的准确度曾经用国立物理实验室初级锰浴校准过。这些源本身不适宜于作能量响应测定, 因为它们产额低, 能谱宽, 常常还伴有大量的 γ 辐射。要缩短源到探测器的距离, 就会使探测器所占空间的通量变化很大。所以这些源的主要用途是刻度“长计数器”。这些长计数器可用来监测加速器产生的辐射场。

表 4 中子源的说明

源	半衰期	绝对发射率, 中子/秒	平均中子能量, 兆电子伏
$Sb^{124}-Be (\gamma, n)$	60 天	10^9	0.024
$Th^{228}-D_2O (\gamma, n)$	1.9 年	1.31×10^6	0.197
$Th^{228}-Be (\gamma, n)$	1.9 年	1.15×10^6	0.827
$Ra^{226}-Be (\gamma, n)$	1620 年	1.6×10^5	0.30
$Ra^{226}-Be (\alpha, n)$	1620 年	4.2×10^6	3.9
$Am^{241}-Be (\alpha, n)$	458 年	7.54×10^6	4.4

用国际放射防护委员会(ICRP)推荐的剂量-通量关系^[5], 把长计数器测得的中子通量换算成剂量当量率。

伯克利核实验室的 400 千伏加速器产生两种核反应。 $D(D, n) He^3$ 反应可用作产额直到 10^9 中子/秒的源(能量为 2.5 兆电子伏), 而 $H^3(D, n) He^4$ 反应使源的产额达到 10^{11} 中子/秒(14 兆电子伏)。“长计数器”在 2.5 兆电子伏的测定值曾与 $D(D, H^3)P$ 反应在固定立体角内发射的质子计数作过核对。14 兆电子伏的

• • •

标定用 α 粒子计数法完成。这两个源的产额足够高，足以刻度源到探测器距离超过 50 厘米的仪器。

为了校准 2.5 兆电子伏以下的仪器响应，曾租用英国奥尔德马斯顿 (Aldermaston) 原子武器研究所 (AWRE) 和特丁顿 (Teddington) 国立物理实验室的 3 兆电子伏范德格喇夫加速器。

曾用过三种反应： $\text{Li}^7(p, n) \text{Be}^7$ 反应提供 30—500 千电子伏的中子； $\text{H}^3(p, n) \text{He}^3$ 反应提供 0.7—2.1 兆电子伏的单能中子； $\text{H}^3(d, n) \text{He}^4$ 反应提供 16—19 兆电子伏的中子。质子轰击能量是 2—3 兆电子伏。

原子武器研究所测定时用的是加有屏蔽的麦克塔格特 (McTaggart) 长计数器^[6]，它以石蜡为慢化剂，测定条件是：用 $\text{Li}^7(p, n) \text{Be}^7$ 反应作源时，将长计数器及石蜡插入物放在距靶 100 厘米、与质子束成 40° 和 60° 角度的位置上。将待测仪器的有效中心置于质子束另一侧面的同样位置。然后用长计数器的计数率来估算待测仪器有效中心处的中子通量。空气冷却的靶厚度为 70 微克/厘米²。轰击质子的能量不超过 2.37 兆电子伏，超过 2.378 兆电子伏时会放出两组中子，一组来自 Be^7 的基态，另一组来自 Be^7 的 430 千电子伏激发态。

$\text{H}^3(p, n) \text{He}^3$ 反应的水冷却 H^3 靶，与伯克利正离子加速器上用的相同。待测仪器放在与质子束成 60° 和 30° 角度的位置上，其有效中心离靶为 65 厘米。

安德森 (Andersson) 和布朗 (Braun) 雷姆计数器 (M 3147 和 N-M 1 型仪器) 的有效中心是根据伯克利核实验室的密封源测定值估算的。

国立物理实验室用德·庞热 (De Pangher) 长计数器^[7]测定了 2600 和 0075 型的雷姆计数器。用 $\text{Li}^7(p, n) \text{Be}^7$ 和 $\text{H}^3(p, n) \text{He}^3$ 反应来测定时，把雷姆计数器放在其几何中心距靶 2 米处的地方，长计数器聚乙烯插入物也离靶 2 米，角度相同，但在束轴线的对面。在这些试验中，曾假定雷姆计数器的几何中心和有效中心是一回事。在上述距离的情况下，这样的假定不会引起显著的误差。

用 $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$ 反应时的角度是 40° 和 60° ，而用 $\text{H}^3(p, n)\text{He}^3$ 反应时的角度是 60° 和 90° 。6 千电子伏 Li^7 靶和 H^3 靶都是用空气冷却的。

为了刻度热中子能区的雷姆计数器，利用了英国原子能局低功率石墨实验反应堆(GLEEP)的热柱。在该热柱中，雷姆计数器整个体积的通量均匀性最初是用 BF_3 计数器校准的，误差不超过 $\pm 6\%$ 。然后，测定是在雷姆计数器无外壳和有 0.040 吋锫外壳的照射条件下进行的。用 BF_3 计数器(事先在伯克利的热通量下刻度过)测量锫下中子通量率。

2. 试验过的中子仪器的说明

表 5 是中子仪器的试验结果。NE 046 型快中子监测器、M 3147 型雷姆计数器和 NM 1 型雷姆计数器，是用原子武器研究所的 3 兆电子伏范德格喇夫加速器试验的。2600 和 0075 型雷姆计数器是用国立物理实验室 3 兆电子伏范德格喇夫加速器试验的。所有仪器事先都用伯克利核实验室的辐射源作过试验。

NE 046 仪器的表头指示为计数/秒，因此其能量响应曲线就以

$$\frac{\text{测量的剂量当量率}}{\text{仪器计数/秒}}$$

对中子能量作图。尽管表头是按线性划分的，试验仪器[当调节到中间量程(20 计数/秒)的中点处准确读数时]在标度较低部分读数极高，在高端则很低。因此，能量刻度时应尽量调节靶电流使仪器的读数总接近于 20 计数/秒。图 30 表明，仪器灵敏度在 200 千电子伏以下迅速下降，对 100 千电子伏以下的中子无响应。

图 31 和 32 是 M3147 和 NM 1 型雷姆计数器的响应曲线。响应的定义是

$$\frac{\text{仪器读数, 毫雷姆/小时}}{\text{测量的剂量当量率, 毫雷姆/小时}}.$$

曲线是对中子能量作的图。

图 33 和 34 是 2600 和 0075 监测器的响应曲线，它是按

表 5 试验过的中子

类型	厂 家	探 测 器	仪 器 范 围
NE046	General Radiological	质子反冲计数器	0 至 400 计数/秒
M3147	EKCO	BF ₃ 计数器	0.1 毫雷姆·小时 ⁻¹ 至 10 雷姆·小时 ⁻¹
NM1	Nuclear Enterprises	BF ₃ 计数器	0.1 毫雷姆·小时 ⁻¹ 至 10 雷姆·小时 ⁻¹
2600	Nuclear Enterprises	Li(Eu)晶体	0.5 毫雷姆·小时 ⁻¹ 至 1 雷姆·小时 ⁻¹
0075	Nuclear Enterprises	He ³ 正比计数器	0.5 毫雷姆·小时 ⁻¹ 至 1 雷姆·小时 ⁻¹

仪器读数

测量的剂量当量率, 毫雷姆/小时

对光子能量作的图。这两台仪器的曲线在 219 千电子伏处归一化。25—100 千电子伏的结果(图 33 和 34 中的点线部分)曾对浅锥法测量的散射辐射校正过。

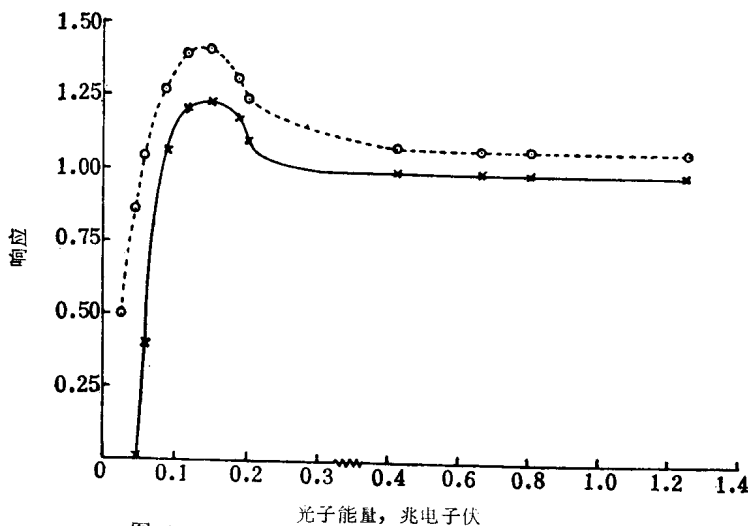


图 1 EKCO N 555(AERE 1349 A 型)的能量响应

响应 = $\frac{\text{仪器读数}}{\text{真正辐照率}} = 1 \text{ (Ra}^{226}\text{)}$; x —— 加盖; o —— 去盖; 6 兆

电子伏响应 = 1.01。

测量仪器的说明

仪器量程或标度	注 解	参 看 图
3 个 量 程	低于 100 千电子伏无响应	图 30
对 数	安德森和布朗计数器	图 31
对 数	安德森和布朗计数器	图 32
对 数	Leake 雷姆计数器	图 33
对 数	Leake 雷姆计数器	图 34

四、结 论

本文给出了许多 γ 和中子测量仪器的能量响应曲线。从这些数据明显地看出, 有些仪器在一定的能量范围内读数十分不准确。

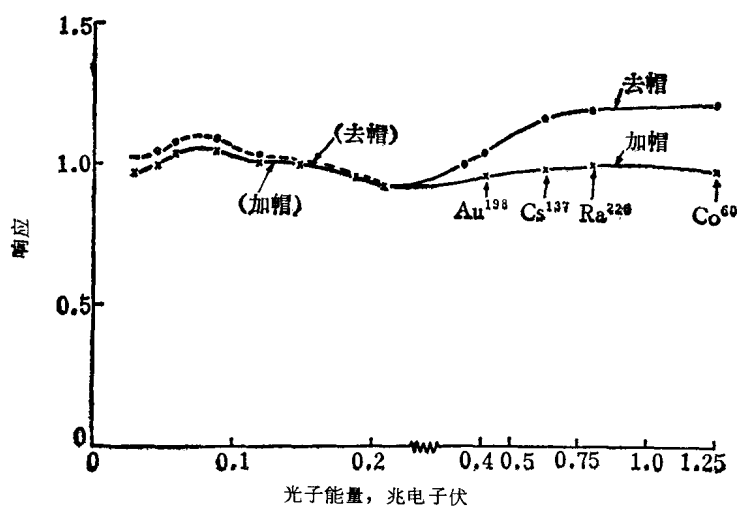
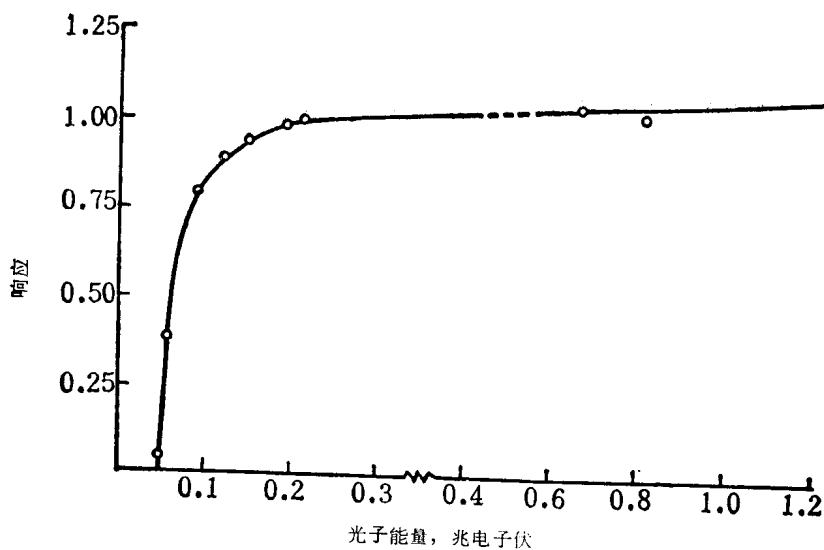
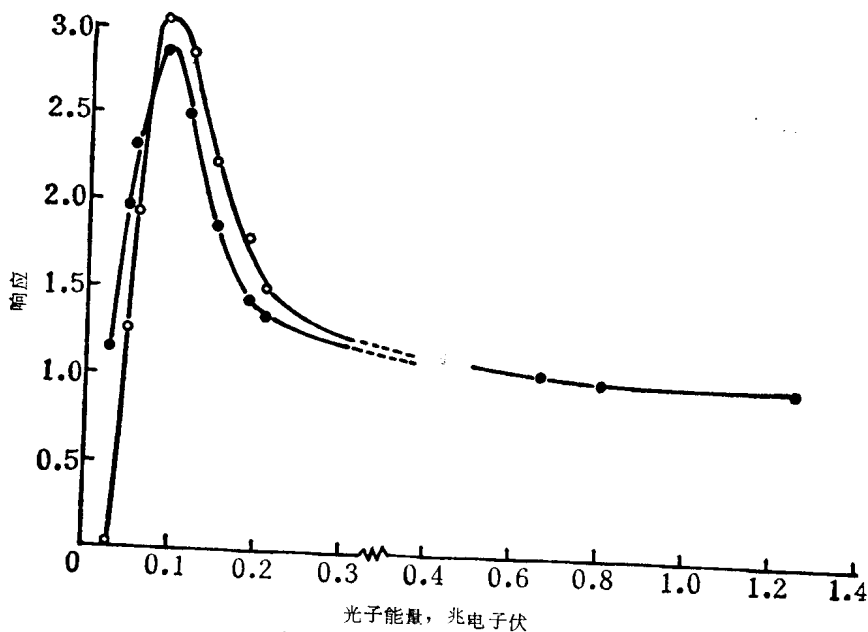


图 2 EKCO N 596 的能量响应

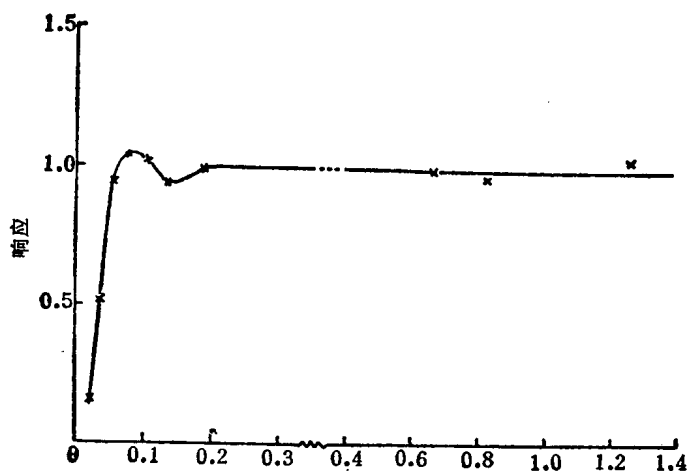
6 兆电子伏响应 = 0.90 (加帽),
= 0.94 (去帽)。



光子能量, 兆电子伏
图 3 EKCO 1452 A 的能量响应

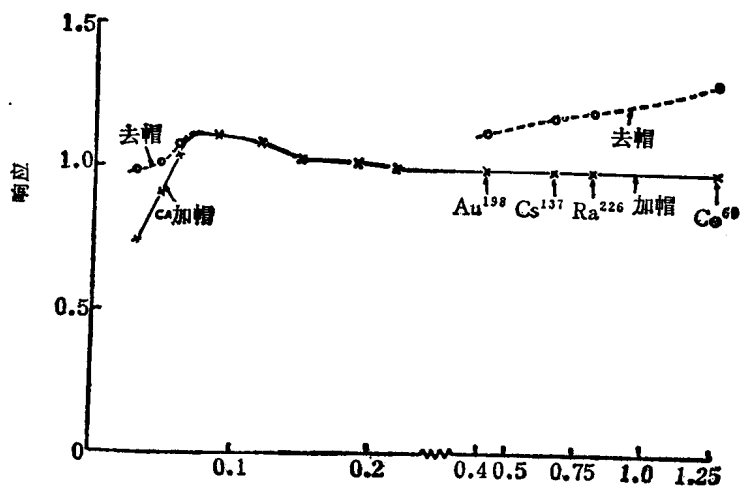


光子能量, 兆电子伏
图 4 Avo 1657 A 的能量响应
○——加盖; ●——去盖。



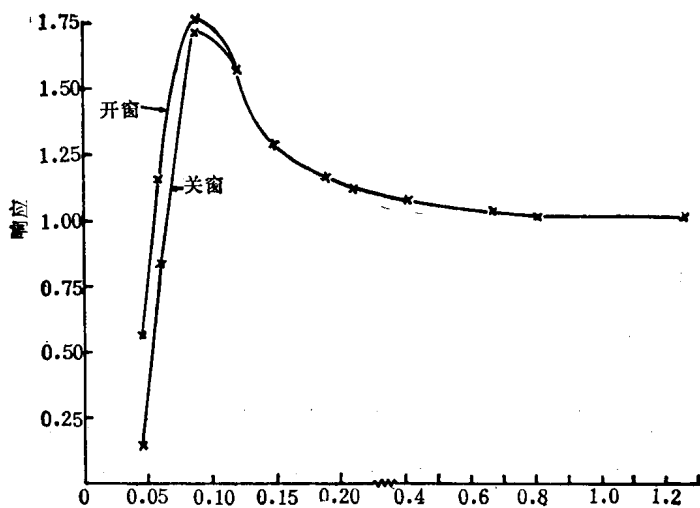
光子能量, 兆电子伏

图 5 Avo 1852 A 的能量响应



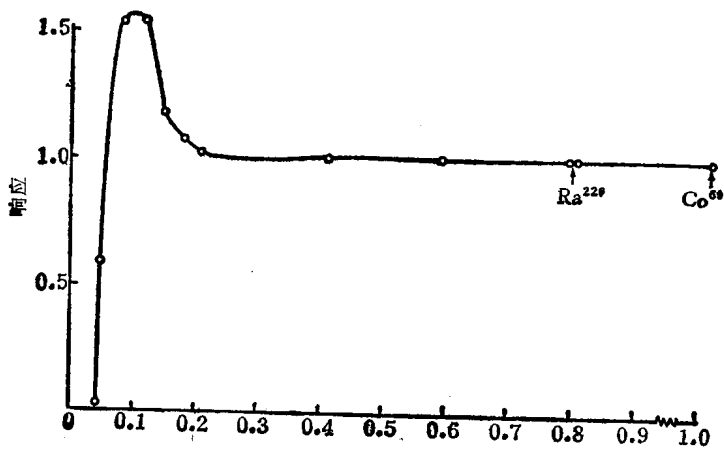
光子能量, 兆电子伏

图 6 Victoreen 740 A 的能量响应



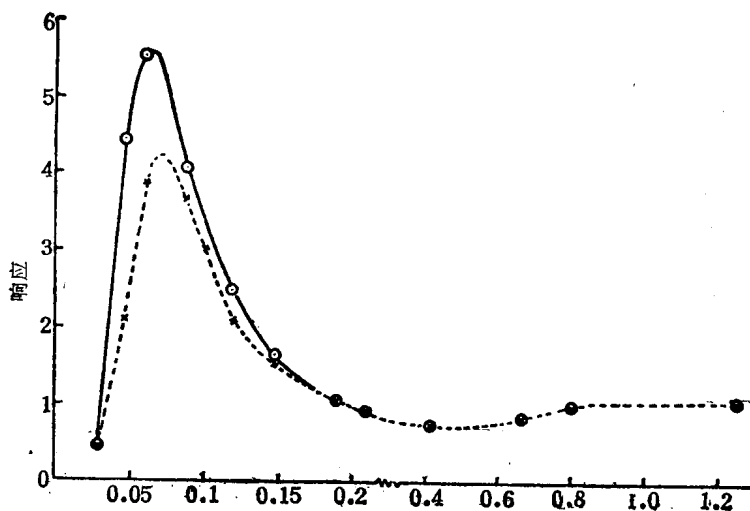
光子能量, 兆电子伏

图 7 Jordan Radgun(AGB-10 KG-SR 型)的能量响应



光子能量, 兆电子伏

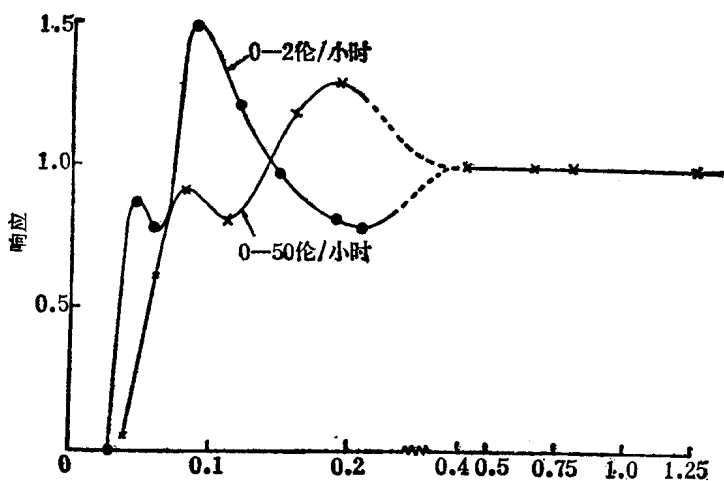
图 8 Marconi TF 1299 的能量响应



光子能量, 兆电子伏

图 9 Bendix-Ericsson 1368 A 的能量响应

6 兆电子伏响应=1.58; $\odot$ ——0—5毫伦/小时量程; $\times$ ——0—2.5毫伦/小时量程。



光子能量, 兆电子伏

图 10 Total Teletector(6112 型)的能量响应

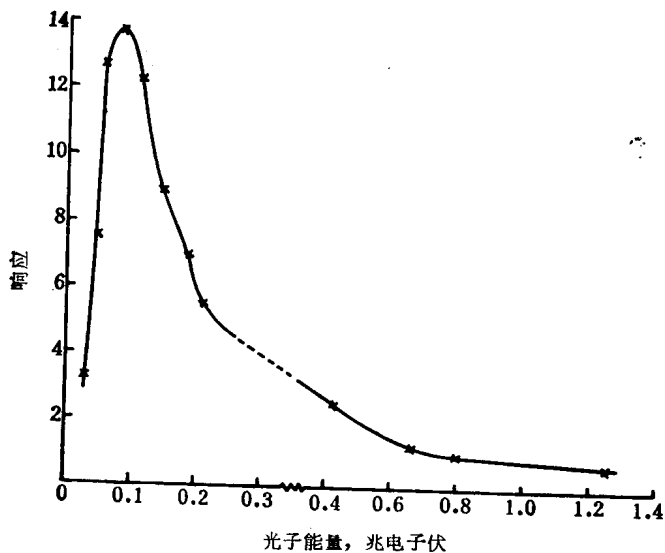


图 11 1413 Å 的能量响应
6 兆电子伏响应=0.24。

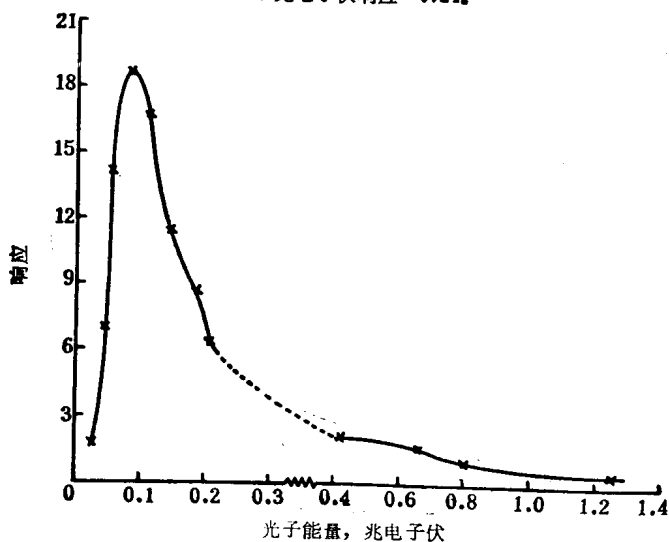


图 12 1597 Å 的能量响应
6 兆电子伏响应=0.22。