

用半导体探测器 探测 α 粒子

[法] 让·唐居伊 著
于立德 译

原子能出版社

内 容 简 介

用 半 导 体 探 测 器

探 测 α 粒 子

[法] 让·唐居伊 著

于 立 德 译

原 子 能 出 版 社

1975年·北京

内 容 简 介

本书介绍用扩散结型和面垒型探测器在铀萃取厂探测厚源 α 粒子的问题。所用探测器包有云母薄膜，能同待分析液接触。测得的能谱很精确，能分辨同一种溶液中两种以上的 α 辐射体。同时还研究了在 β - α 场下测铀的问题。有 Am^{241} 共存时，铀的测量精确度达 $\pm 5\%$ ；当溶液里裂变产物的放射性为100居里/升时，能测出几毫克的 Pu^{239} 。叠加效应是用快放大线路加全耗尽薄探测器来减少的。还介绍了 α - β 粒子的甄别方法。

本书可供从事这方面工作的工人、技术人员参考。

Détection des particules α par semiconducteurs
application au contrôle de l'extraction du plutonium

CEA-R-3442, 1968

Jean Tanguy

用半导体探测器探测 α 粒子

[法] 让·唐居伊 著

于立德 译

原子能出版社出版

张家口地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(只限国内发行)

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $4 \frac{9}{16}$ · 字数 100 千字

1976年2月北京第一版·1976年2月北京第一次印刷

印数 001—2,450 · 定价: 0.55 元

统一书号: 15175·038

目 录

绪 论	1
第一篇 用半导体探测器测量溶液里 α 辐射体的放射 性	5
第一章 用半导体探测器探测带电粒子	7
§ 1.1 探测器	7
1.1.1 P-N 结	7
1.1.2 面垒型探测器	12
§ 1.2 电子线路	12
1.2.1 电荷灵敏前置放大器	13
1.2.2 探测器和放大器的总噪声及能量分辨率	15
第二章 厚源的 α 辐射	19
§ 2.1 厚源的 α 谱	19
2.1.1 能谱举例	22
2.1.2 积分谱或甄别曲线	24
§ 2.2 加屏蔽后的厚源 α 谱	27
2.2.1 有吸收层时的能谱举例	30
2.2.2 有吸收层时的甄别曲线	32
2.2.3 计数率随甄别阈变化的近似式	33
2.2.4 吸收层和放射源里的最大射程和阻止本领的 定	35
第三章 测量溶液里 α 辐射体浓度的装置	41
§ 3.1 装置的介绍	41
3.1.1 探头	41
3.1.2 液流迴路	43

§ 3.2	装置的特性	44
3.2.1	探测效率	44
3.2.2	计数率随浓度的变化	46
3.2.3	探测器防护的选择	49
	结 论	50
第四章	溶液里 α 辐射体放射性的测量与不同能量 α 辐射体的分离	51
§ 4.1	钷溶液的能谱	51
§ 4.2	马库尔工厂的结果	53
§ 4.3	分别确定在同一溶液里钷和镅的放射性强度	54
4.3.1	分界道的确定	56
4.3.2	镅与钷放射性强度的分别确定	60
4.3.3	钷-镅的测量精确度	62
§ 4.4	分别确定在同一溶液里铀和钷的放射性强度	64
	结 论	67
第二篇	在强 β - γ 场下探测 α 粒子。快放大线路与探测器匹配的研究	69
第五章	β - γ 射线对探测 α 的影响	71
§ 5.1	薄结的 β 吸收	71
5.1.1	吸收规律	71
5.1.2	平均能量损耗	73
§ 5.2	甄别曲线在外加偏压和 β 射线影响下的形变	74
5.2.1	外加偏压引起的甄别曲线位移	74
5.2.2	甄别曲线随 β 射线的位移	77
5.2.3	外加偏压和甄别阈的选取	79
§ 5.3	脉冲的叠加	80
5.3.1	计算由脉冲叠加产生的直流电压	82
5.3.2	计算平均电压的涨落	83
5.3.3	探测器反向电流的增加	84

§ 5.4 γ 射线的影响	84
结 论	86
第六章 电荷收集时间的计算	87
§ 6.1 非全耗尽结	89
6.1.1 由电子运动感应的电荷	89
6.1.2 由空穴运动感应的电荷	90
6.1.3 射程 $R \geq W$ 的情况	92
§ 6.2 能量损耗 $\frac{dE}{dX}$ 非常数时的情况	93
6.2.1 射程 $R = W$ 的情况	95
§ 6.3 全耗尽结的电荷收集	97
6.3.1 射程 $R < W$	98
6.3.2 射程 $R \geq W$	98
6.3.3 粒子进入探测器很薄处的情况 ($R \ll W$)	100
6.3.4 载流子迁移率随电场的变化	102
结 论	103
第七章 探测器输出脉冲的波形	104
§ 7.1 电压脉冲	104
7.1.1 探测器的等效电路	105
7.1.2 上升时间的测量	107
7.1.3 说明	110
§ 7.2 电流脉冲	111
7.2.1 电流脉冲的放大	112
7.2.2 探测器固有电容的影响	114
结 论	120
第八章 电流放大器与探测器匹配后的结果	121
§ 8.1 在强 β - γ 场下的 α 计数	121
8.1.1 固体 α 源的探测	121
8.1.2 在裂变产物溶液里测钚	123

§ 8.2	利用脉冲波形甄别 α 和 β 粒子	126
8.2.1	α 和 β 的脉冲波形	129
8.2.2	甄别装置与应用	130
§ 8.3	带快电子线路的 α 谱仪	133

结 论 135

参考文献 138

0.1.3	射极跟随器	1
0.2	能量增益	2
0.2.1	射极跟随器	2
0.3	全耗尽型场效应管	3
0.3.1	射极跟随器	3
0.3.2	射极跟随器	3
0.3.3	射极跟随器	3
0.3.4	射极跟随器	3
1	结 论	1
1.1	脉冲电路	1
1.1.1	脉冲电路	1
1.1.2	脉冲电路	1
1.1.3	脉冲电路	1
1.1.4	脉冲电路	1
1.1.5	脉冲电路	1
1.1.6	脉冲电路	1
1.1.7	脉冲电路	1
1.1.8	脉冲电路	1
1.1.9	脉冲电路	1
1.1.10	脉冲电路	1
1.1.11	脉冲电路	1
1.1.12	脉冲电路	1
1.1.13	脉冲电路	1
1.1.14	脉冲电路	1
1.1.15	脉冲电路	1
1.1.16	脉冲电路	1
1.1.17	脉冲电路	1
1.1.18	脉冲电路	1
1.1.19	脉冲电路	1
1.1.20	脉冲电路	1
1.1.21	脉冲电路	1
1.1.22	脉冲电路	1
1.1.23	脉冲电路	1
1.1.24	脉冲电路	1
1.1.25	脉冲电路	1
1.1.26	脉冲电路	1
1.1.27	脉冲电路	1
1.1.28	脉冲电路	1
1.1.29	脉冲电路	1
1.1.30	脉冲电路	1
1.1.31	脉冲电路	1
1.1.32	脉冲电路	1
1.1.33	脉冲电路	1
1.1.34	脉冲电路	1
1.1.35	脉冲电路	1
1.1.36	脉冲电路	1
1.1.37	脉冲电路	1
1.1.38	脉冲电路	1
1.1.39	脉冲电路	1
1.1.40	脉冲电路	1
1.1.41	脉冲电路	1
1.1.42	脉冲电路	1
1.1.43	脉冲电路	1
1.1.44	脉冲电路	1
1.1.45	脉冲电路	1
1.1.46	脉冲电路	1
1.1.47	脉冲电路	1
1.1.48	脉冲电路	1
1.1.49	脉冲电路	1
1.1.50	脉冲电路	1
1.1.51	脉冲电路	1
1.1.52	脉冲电路	1
1.1.53	脉冲电路	1
1.1.54	脉冲电路	1
1.1.55	脉冲电路	1
1.1.56	脉冲电路	1
1.1.57	脉冲电路	1
1.1.58	脉冲电路	1
1.1.59	脉冲电路	1
1.1.60	脉冲电路	1
1.1.61	脉冲电路	1
1.1.62	脉冲电路	1
1.1.63	脉冲电路	1
1.1.64	脉冲电路	1
1.1.65	脉冲电路	1
1.1.66	脉冲电路	1
1.1.67	脉冲电路	1
1.1.68	脉冲电路	1
1.1.69	脉冲电路	1
1.1.70	脉冲电路	1
1.1.71	脉冲电路	1
1.1.72	脉冲电路	1
1.1.73	脉冲电路	1
1.1.74	脉冲电路	1
1.1.75	脉冲电路	1
1.1.76	脉冲电路	1
1.1.77	脉冲电路	1
1.1.78	脉冲电路	1
1.1.79	脉冲电路	1
1.1.80	脉冲电路	1
1.1.81	脉冲电路	1
1.1.82	脉冲电路	1
1.1.83	脉冲电路	1
1.1.84	脉冲电路	1
1.1.85	脉冲电路	1
1.1.86	脉冲电路	1
1.1.87	脉冲电路	1
1.1.88	脉冲电路	1
1.1.89	脉冲电路	1
1.1.90	脉冲电路	1
1.1.91	脉冲电路	1
1.1.92	脉冲电路	1
1.1.93	脉冲电路	1
1.1.94	脉冲电路	1
1.1.95	脉冲电路	1
1.1.96	脉冲电路	1
1.1.97	脉冲电路	1
1.1.98	脉冲电路	1
1.1.99	脉冲电路	1
1.1.100	脉冲电路	1

绪 论

在铀萃取工厂里，连续测量溶液里 α 辐射体的放射性是检查萃取过程的一项重要工作。人们知道，在反应堆中， U^{238} 俘获 U^{235} 的裂变中子后，经过两次 β 衰变生成 Pu^{239} 。一部分 Pu^{239} 在辐射过程中会俘获中子变成 Pu^{240} ，它再俘获中子时，便形成 Am^{241} ，然后又形成了半衰期更短的其它元素： Cm^{241} ， Cm^{243}，其数量取决于辐照率。上述元素在反应堆里出现，使铀棒不仅含铀元素(U^{234} ， U^{235} ， U^{238})，还含钚、超铀元素和裂变产物。由于反应堆的放射性强度增加是有一定限制的，又由于生成的吸收中子的元素(Xe^{135} ， Sm^{149})降低了堆的反应性。所以上述产物大量积累后，就要扰乱反应堆的运转，加上核燃料的贫化，因此需要定期地更换和再处理铀棒。法国的这种处理工作是在马库尔和阿格的萃取厂进行的。工厂的任务是分离元素，生产铀、钚和某些裂变产物(Gs^{137} ， Sr^{90} ， Co^{60})。

铀、钚和裂变产物的分离是利用了磷酸三丁酯(TBP)溶剂的性质，采用化学方法进行的。TBP溶剂能够在水溶液里有选择地萃取六价铀和四价钚，而不萃取三价钚和裂变产物^[1]。

在分离流程的首端，先把除去镁包壳的铀棒放在硝酸里溶解，然后把溶液送到分离流程的第一循环。该循环的各级里，采用了溶剂逆向流动过程，使元素逐步得到分离。

另一个循环是使元素纯化和浓缩，最后得到金属态的元素。上述全部操作都是连续进行的，并且越来越自动化。为了检查和指导分离的进程，在各分离阶段上测量钚、铀和裂变产物的浓度是重要的。

关于钚的测量。钚浓度低时（低于1克/升），最精确的方法是测量钚辐射的 α 粒子（它的比放射性强度： 2.2×10^9 衰变/克Pu·秒）。钚浓度高（高于1克/升）时，自发裂变产生中子， α 与 O^{17} , O^{18} , N^{14} 等的 (α, n) 反应也产生中子，这样使中子数目相当多，可用中子辐射测量法代替 α 测量法^[2]。

关于铀的测量。铀的 α 放射性强度只有钚 α 放射性强度的 10^{-5} ，最好采用更灵敏的密度测量法。裂变产物的探测是用 γ 计数或用 γ 谱仪实现的。

因为 α 粒子的射程很短（钚的 α 在水中的射程为40微米），加上 α 辐射体存在于硝酸溶液或TBP溶剂里，而硝酸或溶剂对多数探测器又有腐蚀作用，所以给测量 α 辐射带来了困难。为此，必须用很薄的屏蔽物（但能允许 α 穿过）把探测器保护起来，并把探测器放到最靠近溶液的地方去测量。此外，跟钚一起的还可能有其它 α 辐射体，如铀、钍、镭，它们辐射的 α 能量与钚的 α 能量接近，因此给探测钚 α 带来了很大困难。给测量带来更大困难的是存在裂变产物。裂变产物在分离流程首端有非常强的放射性，顺着流程下去逐渐减弱。裂变产物包含如下元素： Zr^{95} - Nb^{95} ， Cs^{137} ， Sr^{90} ， Ge^{144} ，它们的 β 或 γ 辐射不影响对 α 辐射的测量。

为了克服上述困难，研制出了各种仪器^[3-9]，总括起来可以分为两大类：一是用聚四氟乙烯（téflon）或聚乙烯邻苯二甲酸（mylar）膜把探测器保护起来，使它接触待分析液；

另一是使探测器与放射性液保持一定距离。马库尔厂用的仪器^[10]有个鼓轮装置，鼓轮下部浸在溶液里，它一转动就带出一薄层液体，从而限制了探测器接受 β - γ 放射性。

α 的测量几乎在所有情况下都是用闪烁探测器的。该探测器由硫化锌闪烁体和光电倍增管组成。闪烁体必须能做成很薄的片(厚度在20—30微米时才能消除 β - γ 对 α 测量的影响)，更重要的是，要确保它对 α 的发光效率比对 β 的高。

我们研究的目的是制出一种由半导体探测器组成的新型仪器，它的能量分辨率和线性都很好，比硫化锌闪烁探测器的测量精确。实际上，硫化锌闪烁体是由粘合剂(硝酸纤维)把硫化锌的颗粒粘合而成的集合体，所以它是非匀质的探测器：入射粒子的一部分能量可能损耗在两个ZnS颗粒之间的物质中，因此，探测器的输出脉冲与入射粒子能量不严格成正比例。探测效率取决于颗粒大小和集合体里粘合剂的含量^[11]。另外，光脉冲的下降时间常数(3×10^{-6} 秒)很大，在强 β - γ 射线下容易产生脉冲叠加。

然而，半导体探测器能够测出带电粒子的精确能谱，也能用电子学方法把同一溶液里的不同 α 辐射分开。由于电离电荷的收集时间非常短(10^{-9} — 10^{-8} 秒)，可用宽频带电子线路减少 β - γ 的脉冲叠加数。另外，可用外加偏压来选取探测层的有效厚度，这对于根据 β - γ 射线强度来选取相应的探测层有效厚度，带来了很大的方便。

此外，我们还对...进行了...。结果表明...

为...而...。在...过程中，...。这...的...。在...方面，...

（...）...。在...方面，...。这...的...。在...方面，...。这...的...

...。在...方面，...。这...的...。在...方面，...。这...的...

...。在...方面，...。这...的...。在...方面，...。这...的...

第一篇

用半导体探测器测量溶液里 α 辐射体的放射性

本篇讨论只存在 α 辐射体的情况，而不考虑 β - γ 辐射体和裂变产物。

在这物理实验中，探测器主要类型有：P-N 或 N-P 结扩散型硅探测器、面垒型探测器、绝缘体型硅或锗探测器、绝缘体型探测器用在谱仪上探测高能粒子，或者用来探测 γ 射线(闪烁探测器)，面垒型探测器和扩散型探测器都适用于探测低能 α 粒子。本文研究的问题，是在 α 共存时测量 α ，所以有效探测层要很薄，只能使用面垒型和扩散型探测器。下面回顾一下 P-N 结型探测器的的工作原理，面垒型探测器的的工作原理由此容易推得。

1.1.1 P-N 结
P-N 结就是导电性相反的 P 型和 N 型之间的过渡层。把 P 型半导体扩散到 N 型硅里，便得到了 P-N 结。例如，使 P 型硅含有五价的杂质，如 As、Sb、Bi 等，它们将过剩的电子，吸引到晶格中；而使 N 型材料含有三价的杂质，如 B、Al、Ga 等，它们夺取了晶格上的一个电子，成为空穴。

第一卷

甲半得村器既器量察系里

辭檢的的檢檢

本論只備論本，於辭檢的檢辭。

辭檢變變檢檢

第一章 ⊕ 用半导体探测器探测带电粒子

§ 1.1 探 测 器

1949年，麦凯^[12](Mackay)首先发明了半导体核粒子探测器。1960年以来，这种探测器得到了非常迅速的发展，涌现出大批论文^[13-18]。锂扩散补偿技术的出现，使探测器获得了更大更厚的有效探测层。

在核物理实验中，探测器主要类型有：P-N或N-P结扩散型硅探测器，面垒型探测器，锂漂移型硅或锗探测器。锂漂移型探测器用在谱仪上探测高能粒子，或者用来探测 γ 射线(锗探测器)；面垒型探测器和扩散型探测器特别适于探测低能重粒子。本文研究的问题，是在 β - γ 共存时测量 α ，所以有效探测层要很薄，只能使用面垒型和扩散型探测器。

下面回顾一下P-N结型探测器的工作原理，面垒型探测器的工作原理由此容易推论。

1.1.1 P-N结

P-N结就是导电性相反的P、N两区之间的过渡层。把P型杂质扩散到N型硅里，便得到了P-N结。例如，使N型硅里含有五价的杂质Pb, As, Sb(这些杂质带过剩的电子，称为施主杂质)；或使P型材料里含有三价的杂质B, Al, Ga, In(这些杂质夺取了晶格上的一个电子，称为受主杂质)。

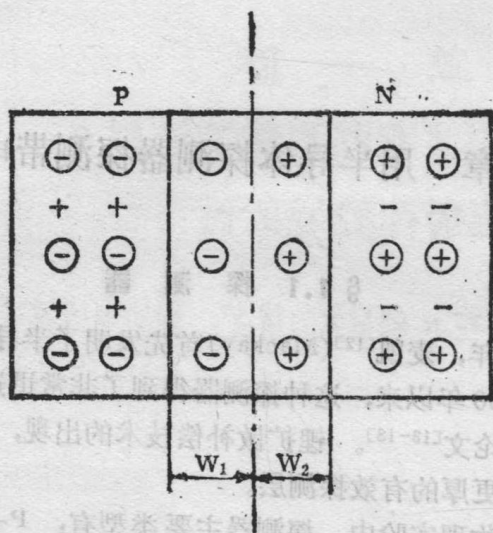


图 1 P-N 结

我们知道，N 区有多余的电子，P 区有多余的空穴，把 P, N 两区紧密接触时，N 区空穴浓度比 P 区低，结附近的空穴便由 P 区扩散到 N 区，同样地，N 区的电子向 P 区扩散。P 区的空穴对应着电离中心，空穴扩散走后，形成负的空间电荷。同理，N 区的电子扩散走后，形成正的电离中心，为正空间电荷。这样，过渡层就出现了电场 E ， E 的方向与后来的载流子迁移方向相反，在空间电荷层的两边出现一扩散电压 V_D 。

a) 结电场

如果在结上加一个外加电压 V_a ，方向与扩散电压 V_D 相同，那么，就加强了内电场。该电场排斥两个区域 (P, N) 的自由载流子，使空间电荷层加厚。这个空间电荷层也叫做耗

层。粗略地假设电场和电压表达式是 P-N 结距离 X 的函数，解泊松方程得到

$$\frac{d^2V}{dX^2} = -\frac{\rho_V}{\epsilon\epsilon_0} \quad (1.1)$$

式中， ρ_V 为空间电荷密度，

对 N 区， $\rho_V = qN_D$

对 P 区， $\rho_V = -qN_A$

q 是电子电荷； N_A 是每立方厘米内受主杂质的原子数； N_D 是每立方厘米内施主杂质的原子数。

空间电荷层里的电场形状如图 2 所示。

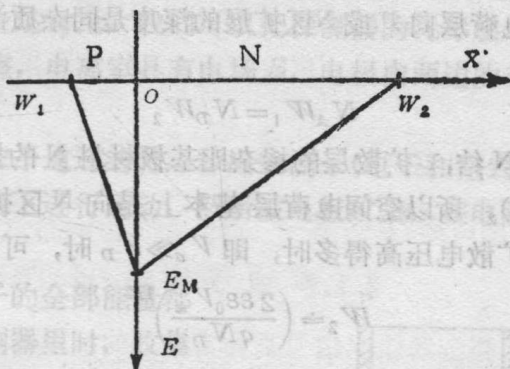


图 2 P-N 结电场

在 N 区， $E(X)$ 随 X 变化的表达式为

$$E(X) = \frac{dV}{dX} = E_M \left(1 - \frac{X}{W_2} \right) \quad (1.2)$$

在 P-N 结，电场有最大值；在 $X = W_2$ 处，电场为零。电场最大值为

$$E_M = -q \frac{N_A W_1}{\epsilon\epsilon_0} = -q \frac{N_D W_2}{\epsilon\epsilon_0}$$

式中, W_1 是 P 区的空间电荷层厚度; W_2 是 N 区的空间电荷层厚度。

将(1.2)式积分便得

$$E_M = \frac{2V}{W_2}$$

式中, $V = V_a + V_D$, V_a 为外加电压; V_D 为扩散电压。

该电场能使电荷在复合之前就被收集起来, 所以在探测粒子时十分重要。

b) 空间电荷层的厚度

为了阻挡粒子, 空间电荷层应有足够的厚度。已经证明, 空间电荷层向 P 或 N 区扩展的深度是同杂质浓度成反比的, 即

$$N_A W_1 = N_D W_2$$

在 P-N 结, 扩散层的掺杂比基极材料 N 的掺杂强得多 ($N_A \gg N_D$), 所以空间电荷层基本上是向 N 区扩展。当外加电压比扩散电压高得多时, 即 $V_a \gg V_D$ 时, 可以得到

$$W_2 \doteq \left(\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 V_a}{q N_D} \right)^{1/2}$$

或者

$$W_2 = (2 \varepsilon \varepsilon_0 \mu_n V_a \rho)^{1/2}$$

式中, μ_n 为载流子在 N 型硅里的迁移率, $\mu_n = 1300$ 厘米²/伏·秒; ρ 为硅的电阻率 (以欧姆·厘米为单位)。

利用上述值, 并忽略 P 区的空间电荷厚度 W_1 , 便可得到空间电荷层厚度的表达式 (采用实用制单位):

$$\text{对于 N 型硅, } W = 0.5 (V_a \rho)^{1/2} \quad (1.3)$$

$$\text{对于 P 型硅, } W = 0.3 (V_a \rho)^{1/2} \quad (1.4)$$

式中, V_a 以伏为单位; W 以微米为单位。