

硫化镉辐射探测器的电极处理 与辐射剂量特性的关系*

物理系原子核物理教研室**

摘 要

本文简要地叙述了 CdS 辐射探测器的制造方法;对 CdS 晶体的电极处理对探测器的剂量——感应电流线性响应和辐射灵敏度的影响进行了定性的讨论;此外,还用光电衰减法近似地测定了电子在 CdS 晶体中的平均寿命。实验表明,真空蒸发铟作电极的 CdS 探测器和蒸发铟后再经银膏处理的探测器相比,前者对辐射的灵敏度较低,但其线性响应及温度效应较好。

随着半导体技术的不断发展和对核辐射探测器小型化的需要,近年来,半导体核辐射探测器的研制引起了很大的注意。半导体探测器和气体电离室比较有体积小等优点。因固体密度比在标准状态下气体密度约大一千倍,所以,固体探测器的体积可比电离室约小十倍;此外,在固体中产生一离子对所需能量约 3 至 5 电子伏特,而气体电离室却需 30 至 40 电子伏特。目前硅和锗半导体探测器在核辐射测量中得到广泛的应用。在 γ 辐射剂量测量中,由于导电型的硫化镉半导体探测器有一种内放大的导电过程,使得辐射产生的导电电流比辐射在晶体中所产生的原电离电流大几个数量级,如果和相同体积的气体电离室相比,其输出电流要大 10^7 倍^[1]。也就是说,用 1 伦/小时的 γ 剂量率照射 CdS 晶体,输出电流可达几个微安。因此,用 CdS 晶体测量 γ 剂量率时,测量线路是很简单的,用干电池和微安表组成的线路即可进行辐射测量。其次,CdS 晶体在高剂量率的情况下,仍有较好的线性响应。据报导,从 5 至 10^3 伦/小时范围内, γ 剂量测量准确度可达 $\pm 15\%$ ^[2],测量范围可达 10^7 伦/小时。这使 CdS 晶体可用来测量高强度的剂量率。另外, γ 辐射对硫化镉晶体的辐射损伤是很小的,Sessoms 曾用 23000 居里的钴源连续照射 CdS 晶体 1000 小时,照射后几分

* 1973.12.10 接稿

• • 張純祥执笔

钟,导电率和照射前相同。因此,用CdS晶体制作γ剂量仪是有优点的。

下面将简要介绍CdS探测器的工艺过程;对探测器的剂量线性响应、灵敏度和温度效应与电极处理的关系进行定性讨论;此外,还近似测量了电子平均寿命,讨论了电子平均寿命和灵敏度的关系。实验表明,真空蒸发镱作电极的CdS探测器灵敏度较低,但线性响应较好,温度对灵敏度影响较小;而蒸发铟后再涂银膏和热处理的探测器,灵敏度较高,但线性较差,温度影响比前者大。

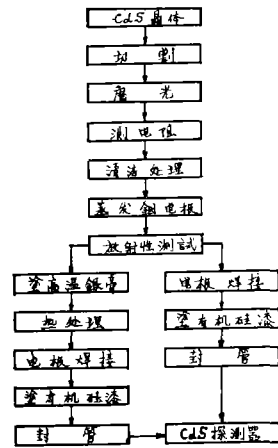
硫化镉探测器的电极处理

实验中所用的硫化镉晶体,是用下述方法制备的:光谱纯的硫化镉粉末,清洁处理后装入直径为2厘米的生长管中,用升华结晶法制成晶体^[3]。晶体的暗电阻达 10^9 欧姆。在室内光照下其电阻为 10^7 欧姆,只有少数晶体光敏性较好,其室内光电阻可达 10^5 欧姆,经电极处理后,晶体光敏性有显著提高。大部分室内光电阻小于 10^4 欧姆。通过电极处理使大部分原来对γ辐射灵敏度小于 10^{-3} 微安/仑/小时晶体的灵敏度有较大的提高,少数晶体灵敏度达到约2微安/仑/小时。(图一)为电极处理的工艺流程,详细工艺在“硫化镉单晶辐射剂量仪的试制”^[8]一文中介绍过,这里不再详述。

CdS探测器的伏安特性曲线与剂量率线性响应

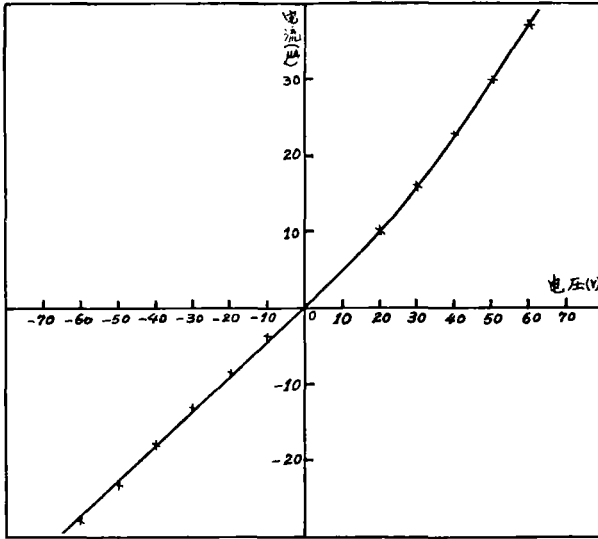
作为γ剂量率探测元件的CdS晶体,只有获得好的欧姆接触电极,才能对γ辐射有较好的线性响应,为了得到好的欧姆接触,必须考虑下列两个因素:(1)电流对电压的阈值应很小;(2)电流与电压的比值不随电压而改变。这就是说欧姆接触电极的晶体的伏安曲线是线性的^[5]。

CdS晶体是n型半导体,要获得CdS晶体的整流接触是比较容易的,采用高功函数的金属作为电极材料,就可以使晶体具有一定的整流效应。而不少的作者^[4]都认为In是CdS晶体做成欧姆接触较好的电极材料,而且它在空气中比较稳定,不会和CdS晶体发生作用。用镱作电极材料而产生欧姆接触的方法有三种:(1)超声熔镱法^{[6][7]},这种方法制成的探测器,剂量率在 10^6 仑/小时范围内仍有良好的线性响应;(2)CdS晶体上真空蒸发一层不透明的 I_n 层;(3)真空蒸发镱电极后,在 I_n 电极上涂上一层高温银膏,然后在Ar的气氛中进行扩散处理。这里仅对后两种

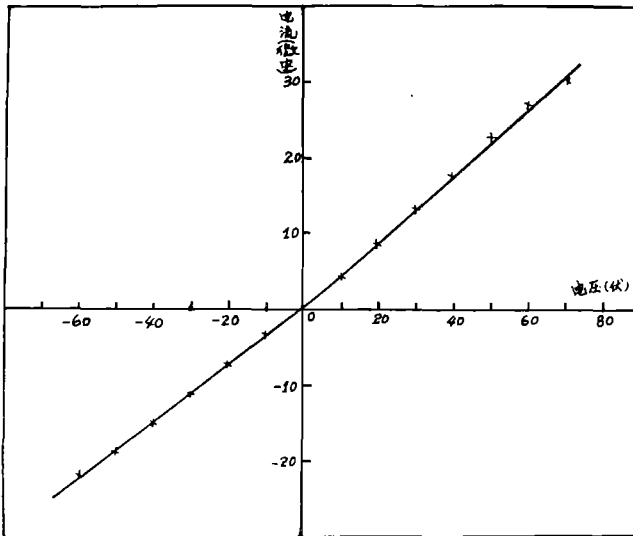


图一 CdS探测器工艺流程

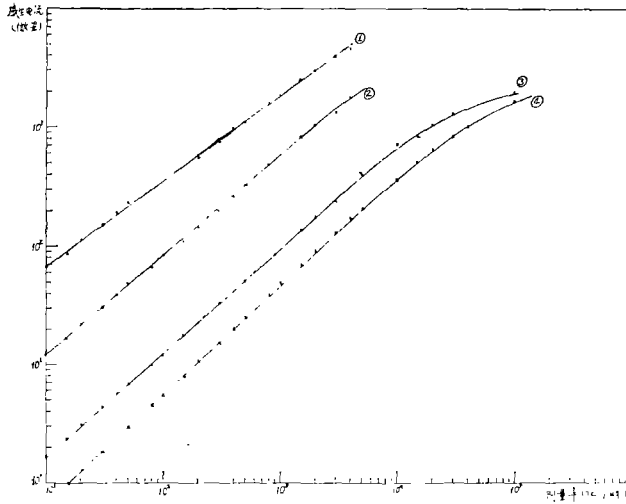
方法进行讨论。(图二、三、四、五)给出了采用后面两种处理方法所制成电极的CdS探测器的伏安曲线和剂量率—感应电流特性曲线。用第二种方法处理的903-2晶体,其反向伏安特性的电流电压比值较接近于一常数,也没有明显的整流阈电压出现。从‘图四’中剂量—电流响应曲线可看出,其线性较好,线性范围也较宽。用第三种方法处理的晶体,它们对辐射响应的灵敏度较高,显然,银膏热处理对晶体性能是有显著影响的。



图二 903-2号晶体的接触特性

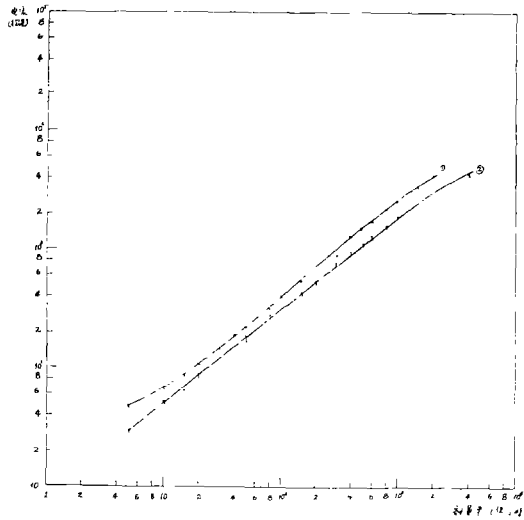


图三 503号晶体的接触特性



图四 硫化镉单晶 γ 剂量率特性曲线

① 503号晶体 ② 902号晶体 ③ 903—1号晶体 ④ 903—2号晶体



图五 硫化镉单晶 γ 剂量率特性曲线

① 101号晶体 ② 205号晶体

这里所列举的晶体是实验所处理几十个样品中有代表性的几个，从中可看出两种处理方法对伏安特性及剂量特性均有一定的影响。

CdS晶体的电子平均寿命和灵敏度的关系

研制用于剂量测量的CdS探测器时，我们希望能得到线性好，灵敏度高的晶

体。CdS晶体对γ辐射响应的灵敏度是和CdS晶体半导体特性，如非平衡载流子寿命和迁移率，有很密切的关系。纯半导体材料中，迁移率由晶格散射的弹性散射常数决定的，弹性散射常数越大，迁移率就越大。当有陷阱存在时，观测到的迁移率小于理论值。在CdS晶体中，电子迁移率远比空穴迁移率大。非平衡载流子平均寿命τ是一重要参数，它由复合率所决定，从CdS晶体的导电过程可以进一步分析非平衡载流子平均寿命τ对灵敏度的影响。

假定把电子看作导电的唯一载流子，打在晶体上的γ光子被晶体吸收。当光子把能量交给价电子时，在晶体中会产生电子—空穴对。被激发到导带的价电子，给晶体导电带来贡献。设辐射在晶体的单位体积中每秒产生f个电子空穴对，那么导带中自由电子密度增量为Δn，

$$\Delta n = f\tau \dots\dots\dots (1)$$

附加导电率

$$\Delta\sigma = \Delta ne\mu = e\mu\tau f \dots\dots\dots (2)$$

其中，μ是电子迁移率

假定晶体为平行板形状，两电极间的距离是L，两电极间的电场强度为E，横截面为A，外加电压为V，那么辐射在晶体产生的感生电流i应为，

$$i = \Delta\sigma \cdot E \cdot A \dots\dots\dots (3)$$

其中 $E = \frac{V}{L} \dots\dots\dots (4)$

将(2)(4)式代入(3)式中，便得出

$$i = \frac{\Delta\sigma \cdot A \cdot V}{L} = \frac{A \cdot V \cdot e \cdot \mu \cdot \tau \cdot f}{L} \dots\dots\dots (5)$$

另一方面，辐射在单位时间内在晶体中产生的电子—空穴对总数为F：

$$F = f \cdot A \cdot L \dots\dots\dots (6)$$

假定这些电子—空穴对全部为电极收集，则辐射在晶体中产生的原电离电流I：

$$I = Fe = f \cdot A \cdot L \cdot e \dots\dots\dots (7)$$

G = i/I称CdS晶体内放大系数

$$= \frac{V \cdot \mu \cdot \tau}{L^2} \dots\dots\dots (8)$$

从公式(8)中可看出CdS晶体对γ辐射的灵敏度和外加电压成正比，和电极间距离平方成反比，此外，G还和μτ成正比。为了对灵敏度作进一步的讨论，实验中对晶体的电子平均寿命用光电衰减法近似地进行测量。

若用矩形光脉冲来产生导电电子，光照停止时刻为 $t = 0$ ，此时电压变化为 $\Delta V = \Delta V_0$ ，此后某一时刻 t 时，光注入引起的导电电压降变化为：

$$\Delta V_t = \Delta V_0 e^{-t/\tau} \dots\dots\dots (9)$$

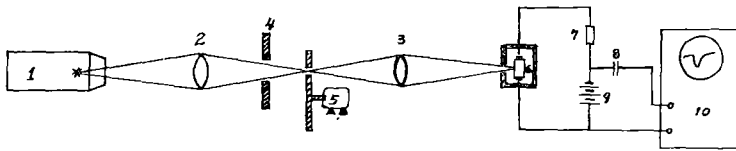
τ 是电子平均寿命。

如果导电率减至初始值一半的时间为 $t_{1/2}$ ，这就是电压值降至原值一半的时间：

$$t_{1/2}/\tau = \ln 2 \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \dots\dots\dots (11)$$

$t_{1/2}$ 可直接从示波器测出，其测量装置如(图六)：



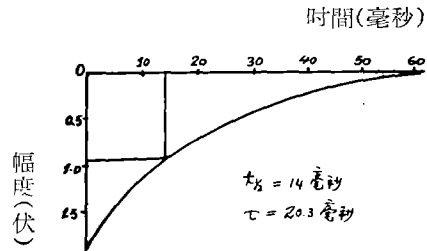
图六 电子平均寿命测量装置

- 1.光源 2.透镜 3.透镜 4.光栅 5.转盘 6.CdS晶体(在光屏蔽盒内)
- 7.电阻 $R = 3.3M\Omega$ 8.电容 $C = 20\mu f$ 9.偏压90伏 10.慢扫描示波器

实验装置给出的光脉冲上升前沿为0.5毫秒，后沿下降时间为0.7毫秒，脉冲宽度是4毫秒的矩形光脉冲。被测晶体的从示波器上观察到的光脉冲衰减波形如(图七)所示。

所测晶体的电子平均寿命和对 γ 辐射灵敏度如下表。

从表中列举的数值中可看出，用蒸发铟作电极的晶体载流子寿命比经银膏处理的稍小。从公式(8)中可知，如果所有晶体的其他参数相同，那么寿命较大的晶体灵敏度应较高。903—1和903—2两个样品是从一块 $5 \times 6 \times 1mm^3$ 的晶体分割出来的



图七 902号晶体光脉冲衰减波形

的，它们厚度 L 相同，如果电子迁移率 μ 值相近似的话，灵敏度由 τ 决定， $\tau_{903-1}/\tau_{903-2} = 1.6$ ，实验给出其灵敏度之比为2.0，这和理论计算基本符合。其次，用同一种方法处理的205和503号样品，前者载流子寿命比后者小，但灵敏度比它大，这是因为205晶体比503晶体的厚度约小一倍，这使得其灵敏较高。

不少作者曾指出， γ 辐射灵敏度较高的晶体饱和和剂量率较低，而灵敏度低的

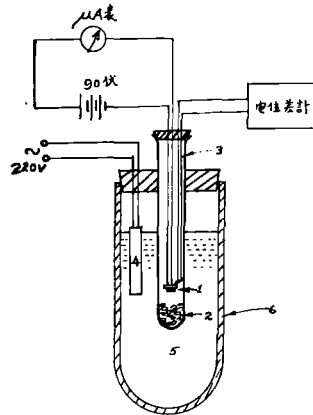
电子平均寿命和灵敏度

数值 项目 \ 晶体	101	205	503	902	903-1	903-2
电子平均 寿命(毫秒)		43.0	52.0	20.3	33.0	20.3
灵敏度 微安/侖/小时 (90V 电压)	2.56	1.77	1.31	0.56	0.092	0.046
电极 处理	鍍錫 和銀膏	鍍錫 和銀膏	鍍錫 和銀膏	錫	錫	錫

晶体线性范围较寬。从(图四)中可看出, 903—2 晶体的线性范围比903—1寬, 灵敏度则相反。这就是说, 在进行低剂量率测量时, 希望得到灵敏度高的晶体, 必须获得载流子寿命较大的样品。相反地, 在进行高剂率测量时, 为了使晶体仍有较好的线性响应, 则要选用 τ 值小的晶体, τ 值小, 晶体对輻射的响应时间亦减小。

溫度效应

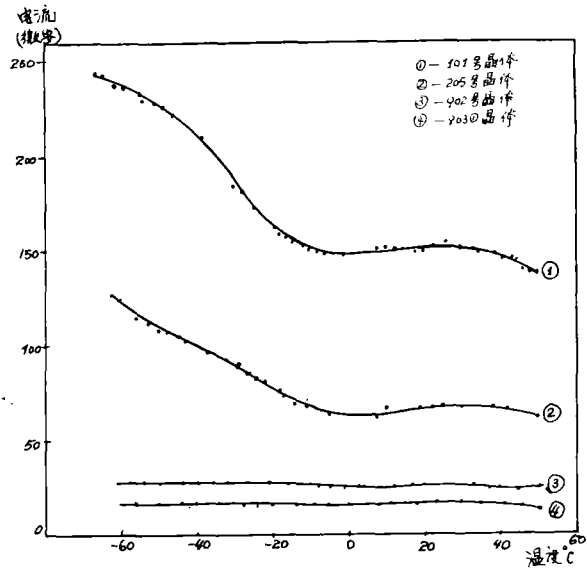
γ 輻射的灵敏度与温度的关系, 对探测器来说是十分重要的性能。特别是室外使用的探测器, 要求灵敏度随温度的变化尽可能地小。如何制造灵敏度受温度影响小的探测器, 是实验中需解决的一问题。为此, 我们对这两种不同电极处理晶体进行温度效应的测定。实验装置如(图八)所示: 在一个闊口的杜瓦瓶中, 放入无水酒精, 加入干冰, 使酒精温度降至 -70°C 。瓶中放入一硬质玻璃筒和电加热器, 在硬质圓筒中放入少量的硅胶干燥砂, 使冷却时, 空气中的水蒸气不会凝结在探测器上, 从而不会引起漏电。当装置达到热平衡后, 和晶体相接触的康銅—銅热电偶读出探测器的温度。整个装置放在 $\text{Co}^{60}\gamma$ 輻射场中辐照, 剂量率为 123 侖/小时。加热器通电后, 使探测器温度逐步上升, 记下每个温度相应的感生电流值。



图八 测量溫度效应的装置

- ①探测器
- ②干燥砂
- ③康銅—銅热电偶
- ④电加热器
- ⑤无水酒精加干冰
- ⑥杜瓦瓶

测量的灵敏度与温度曲线由(图九)示出。这两类探测器有明显不同的温度特性, 如果以温度为 20°C 电流值为标准, 当温度从 -50°C 变至 $+50^{\circ}\text{C}$ 时, 902和903—1两样品的变化率小于19.5%和19.8%; 整个温度变化范围内, 曲线平滑地变化。经银膏热处理的两个样品101和205, 相对变化率是64.7%和68.7%, 在整个温度变化的范内, 当温度低于 -20°C 出现一个明显变化的趋势, 而在高于 -20°C 温度区域内, 曲线的变化率显著减少。Копась^[9]对CdS晶体温度特性测量表明, 在不同剂量率的 γ 辐射下, 温度效应是有明显的不同, 而剂量率越高, 灵敏度随温度变化越明显。其实验测得温度效应曲线从变化规律来看与本实验有相同之处, 都是在低温部分灵敏度较高。实验所观察到电极处理对温度特性的影响这一现象, 对进一步研究CdS探测器的导电过程有一定的意义。



图九 硫化镉晶体的温度特性

① 101号晶体 ② 205号晶体 ③ 902号晶体
④ 903号晶体 恒定照射剂量率为123 伦/小时

我们的研制工作得到广东省职业病防治院、广东农业科学院等单位以及王述年、刘启礼和汪如贵等同志的大力协助和对实验提出宝贵意见, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Turner, B. A., Mash, D. H., and Fowler, I. F., Phys. Med. Biol. Vol. 8, 439 (1963)
- [2] 国外核子仪器手册221页。
- [3] 原子科学技术 1966年第五期330页。
- [4] Smith, R. W., Phys. Rev. vol. 197, 1525 (1955)
- [5] 田中昭二, 应用物理 Vol. 26, No7, 280 (1957)
- [6] Hollander, L. E., Rev. Scin. inst. Vol. 28, 322 (1957)
- [7] Fowler, J. T., phys. Med. Biol. Vol. 8, 1. (1963)
- [8] 硫化镉单晶辐射剂量仪的研制 (1972.北京)
- [9] Н. Ф. Копась, А. П. Галушка, И. д. Конозевенко, ПТЭ, 1972, No5, 59.