

# X, $\gamma$ 射线谱仪用的半导体探测器

王 征 华

(中国原子能科学研究院)

半导体探测器是六十年代发展起来的一种新型探测器。随着硅、锗单晶性能的提高,硅(锂) [Si(Li)]、锗(锂) [Ge(Li)] 及高纯锗 [HPGe] 探测器的制备工艺日趋完善。与此同时,随着电子学线路的改进, Si(Li), Ge(Li), HPGe 探测器及低噪声电子学线路和低温装置所组成的 X,  $\gamma$  射线谱仪性能得到迅速提高,逐渐发展成高效率、高能量分辨率的 X,  $\gamma$  谱仪,这就使应用  $\gamma$  射线核能谱学增添了新的实验数据,同时使微量及痕量元素分析技术达到了新的水平。

半导体探测器一般又称固体探测器<sup>[1]</sup>,它实质上是由一块半导体材料所组成的电离室。对核谱仪用的探测器的基本要求是使输出脉冲信号与入射光子能量成正比,且有好的能量分辨率,这就要求所选择的单晶材料对产生一电子-空穴对所需的平均能量  $\omega$  要尽量小,载流子迁移率大,晶体完整性好,无俘获效应,且易拉制成足够大的单晶。到目前为止,比较合适的半导体材料是元素半导体硅及锗单晶。为了保证有完全的电荷收集,需要在探测器内具有足够高的电场,因此一般采用 NP 结和 NIP 结型结构。为了获得高的信号噪声比,探测器漏电流必须尽量小,这就除要求有严格的制备工艺外,还必须使硅、锗探测器在低温 77K 下工作。由于光电吸收系数与探测器材料的原子序数  $Z$  的五次方成正比, Si 材料 ( $Z = 14$ ) 只适合于用来测量 1—30keV 低能 X 射线; Ge 材料 ( $Z = 32$ ) 能用于更高能量  $\gamma$  射线的测量(可测量到 10MeV)。

## 一、HPGe 探测器

七十年代末获得了杂质浓度为  $10^9$ — $10^{10}$

个/cm<sup>3</sup>的大体积、晶格完整的高纯锗单晶材料,由于它制备工艺简单,可以在室温储存,而性能完全达到了 Ge(Li) 探测器水平,因此近二年来 Ge(Li) 探测器已为 HPGe 探测器所取代。

HPGe 探测器是一个典型的突变 NP 结型二极管,它是由在 N 型(或 P 型)高纯锗单晶两侧做 N<sup>+</sup>, P<sup>+</sup> 接触电极所构成。一般用锂扩散方法得 N<sup>+</sup> 电极,用硼离子注入(或蒸钼)得 P<sup>+</sup> 电极,如图 1(a) 所示。假定杂质浓度在锗单晶

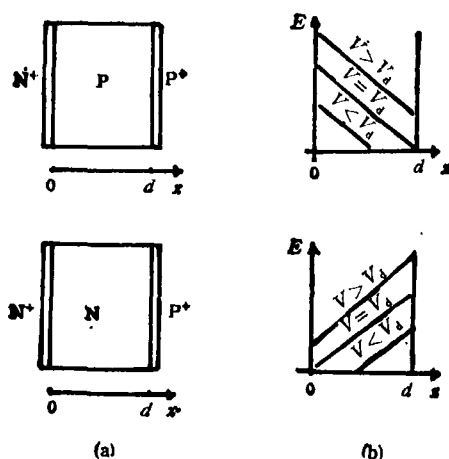


图1 平面型 HPGe 探测器结构及电场分布图  
(a) 结构图; (b) 电场分布图

内是均匀分布的,则平面二极管的耗尽层厚度

$$W = \left( \frac{2\epsilon V}{qN} \right)^{1/2},$$

其中  $V$  为反向偏压,  $N = |N_A - N_D|$  (纯杂质浓度),  $\epsilon$  是锗的介电常数,  $q$  是电子电荷。随着  $V$  的增加,使耗尽层厚度达到 Ge 材料厚度  $d$ ,这时所加的电压称耗尽电压。耗尽电压

$$V_d = \frac{Nqd^2}{2\epsilon}.$$

探测器电场分布如图 1(b) 所示。HPGe 探测

器经常使用在全耗尽条件下,一般希望探测器能承受足够高的过耗尽电压,以保证欧姆接触处有足够高的电场及好的电荷收集特性。

测量低能 X,  $\gamma$  射线用的 HPGe 探测器,一般为平面型结构,通常有两种结构形式:(1) 构槽型:如图 2(a),此结构的主要优点是能耐高的表面击穿电压及低的表面漏电流,有效面积小,对低能光子有高的能量分辨率。(2) 大面积薄窗型:如图 2(b)所示,在它的前表面和圆柱面周围都注入硼离子,而在后表面中心部分扩散锂,它具有大的体积,但电容值不大,因而对低能、中能光子既可得到较好的能量分辨率,又具有较高的灵敏度。一般用 N 型材料作低能 X,  $\gamma$  探测器更合适,因为在入射窗处有强的电场,以保证对低能 X,  $\gamma$  射线有好的探测特性。

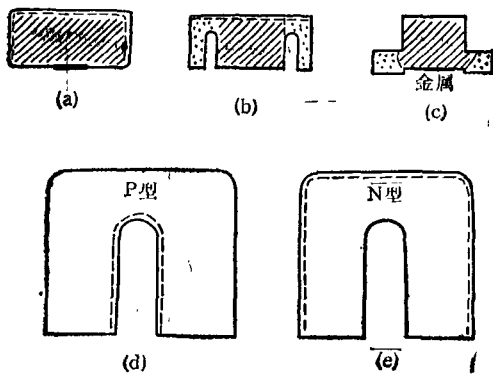


图 2 探测器结构图

(a) 大面积薄窗型; (b) 槽沟型; (c) P 型 HPGe 同轴;  
(d) N 型 HPGe 同轴; (e) 顶帽型  
—— 锂扩散层; ..... 硼离子注入层; ▨ 有效面积  
▨ 原材料

对高能  $\gamma$  射线为了提高它的探测效率,人们发展了同轴型结构的 HPGe 探测器,它的中央有较深的离底部为 10mm 的孔,孔径约 8mm,这种结构又称为单开端同轴型 HPGe 探测器<sup>[2]</sup>,它的优点是只有一个暴露的外表面,制备方便。P 型 HPGe 同轴探测器如图 2(c) 所示,要求锂扩散形成的 N<sup>+</sup> 电极在圆柱体的外表面,离子注入(或蒸钼)制得的 P<sup>+</sup> 电极在内孔壁上,这种电极安排使探测器有最低的全耗尽电压。P 型 HPGe 同轴探测器,选用  $1 \rightarrow 2 \times 10^{19}$  个/cm<sup>3</sup>

杂质浓度的单晶,偏压只要略高于过耗尽电压,则探测器的主要部分就有较高的电场,因而具有好的电荷收集特性。一般情况下,电场强度 50V/mm 时,电荷的俘获效应就可以忽略不计。P 型 HPGe 同轴探测器的缺点是外表面锂层(死层)较厚( $\sim 600 \mu\text{m}$ ),它只能用于测量大于 40keV  $\gamma$  射线。N 型 HPGe 同轴探测器<sup>[3]</sup> 又称 X- $\gamma$  型或反极型 HPGe 同轴探测器,其结构如图 2(d) 所示。在它的外表面用硼离子注入作成 P<sup>+</sup> 电极(P<sup>+</sup> 厚度小于  $0.3 \mu\text{m}$ ),在中心孔壁用锂扩散作 N<sup>+</sup> 电极。这种探测器的优点是有薄的死层,可以测量 3keV—10MeV 很宽能区的 X,  $\gamma$  射线。N 型 HPGe 同轴探测器的另一个突出的优点是它具有更好的抗中子辐照损伤的能力,比 P 型 HPGe 同轴探测器高 25 倍,因此更有利于在中子辐照场使用。

由于锗的禁带宽度较窄,在室温下会产生热生载流子,因此 HPGe 探测器必须在液氮温度下工作,只要对 HPGe 探测器表面进行钝化,探测器才可以在室温下保存及运输。

## 二、Si(Li) 探测器

Si(Li) 探测器<sup>[4]</sup>是在一块低阻 P 型硅单晶上,用锂离子漂移补偿方法得高阻本征型硅单晶,金与高阻硅构成 Si(Li) 面垒型探测器。而金层即为探测器的人射窗。为了使探测器能承受高的电场及具有低的漏电流, Si(Li) 探测器一般采用沟槽型和顶帽型【如图 2(e)】两种结构。为了降低 Si(Li) 探测器的漏电流及噪声,除要进行很好的表面处理外, Si(Li) 探测器还必须在液氮温度 77K 下工作。Si(Li) 探测器在室温时反向电流为  $10^{-7}\text{A}/1000\text{V}$ , 低温时为  $10^{-13}\text{A}/1000\text{r}$ , 同时 Si(Li) 探测器亦不宜在室温下逗留时间太长,否则其性能会受到影响,因此 Si(Li) 探测器还必须在 77K 下保存和运输。

## 三、低温装置

为了使 HPGe 及 Si(Li) 探测器能在 77K

下工作,同时防止水蒸汽凝结在探测器上,探测器通常放在一个真空度为  $10^{-6}$  Torr 冷指中,然后把冷指插入液氮冷罐中。探测低能 X,  $\gamma$  射线时,铝帽顶上装一铍窗来减小它对低能射线的衰减。

#### 四、探测器性能

##### 1. 电容特性

平面探测器的电容值  $C = \frac{\epsilon A}{4\pi W}$ , 其中  $A$ ,  $W$  分别是耗尽区的面积和厚度。当探测器全耗尽时,  $C = \frac{\epsilon A}{4\pi d}$ 。同轴型探测器的电容值  $C$  可近似表示为

$$C \approx \frac{\epsilon l}{2\pi R_2/R_1},$$

其中  $l$  为探测器长度,  $R_2$ ,  $R_1$  为耗尽区外径和内径。低偏压时电容值大,主要是由于耗尽层很薄,当探测器达到全耗尽时,电容就不随电压的增加而变化,因此从测得的电容特性曲线,就知道全耗尽电压值  $V_d$ 。Si(Li) 探测器的面积很小(约  $10-200 \text{ mm}^2$ ),厚约  $3-5 \text{ mm}$ ,考虑到接线分布电容,它的电容值约在  $1-5 \text{ pF}$  之间。

##### 2. 反向电流

探测器的反向电流由扩散电流、产生电流和表面漏电流三部分组成,但后者贡献最大,HPGe 探测器的反向电流在几千伏偏压时可达  $10^{-11}-10^{-12} \text{ A}$ , Si(Li) 探测器反向电流在  $1000 \text{ V}$  偏压时可达  $10^{-13}-10^{-14} \text{ A}$ 。

##### 3. 能量分辨率

测量半导体探测器一个重要谱特性——能量分辨率所用的电子仪器(谱仪系统)框图表示于图 3。HPGe 及 Si(Li) 谱仪系统之间的主要区别是所用的前置放大器不同。HPGe 探测器是采用直流耦合阻容反馈电荷灵敏前置放大器,它的输出幅度  $V \left( V = \frac{Q}{C_f} \right)$  与探测器输出电荷  $Q$  成正比,与前置反馈电容  $C_f$  成反比,因而输出幅度与探测器本身的电容值无关。这种

物理

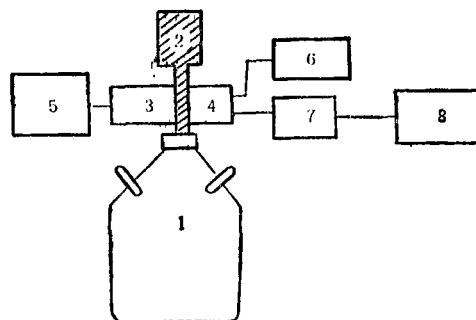


图 3 谱仪系统框图

1.冷罐; 2.冷指; 3.滤波盒; 4.前置放大器; 5.高压电源; 6.脉冲产生器; 7.放大器; 8.多道分析器

电荷灵敏前置放大器目前达到的噪声水平在零电容时为  $600 \text{ eV}$ , 噪声斜率为  $20 \text{ eV/pF}$  (放大器成形时间常数为  $3 \mu\text{s}$ )。前置放大器第一级场效应管(FET)一般放置在室温下,有时为了降低噪声,亦有把 FET 移入冷指中。Si(Li) 探测器要求整个谱仪系统的噪声更低,一般采用脉冲光反馈低温前置放大器,它的第一级 FET 与探测器同置于真空低温室内,对 FET 设有调温装置。目前获得电子学噪声小于  $100 \text{ eV}$ 。

能量分辨率表示对两条相近能量的谱线分开的能力,一般以谱线半宽度  $\Delta E(\text{FWHM})$  表示。影响半导体探测器谱仪系统能量分辨率的主要因素有三个: (1) 电子-空穴对产生和收集过程中的统计起伏。若光子辐射能量  $E$ , 它所产生的电荷载流子的统计起伏,决定了能量分辨率的极限值,可用谱线半宽度  $\Delta E_s$  表示。(2) 探测器电容及漏电流引起的电子学噪声。探测器与前置放大器、放大器相连时,探测器电容相当前置放大器的外接电容,在未加偏压时,探测器的电容值大,于是谱仪噪声也大,探测器加偏压后,噪声随偏压增加(电容减小)而减小。探测器反向电流产生的噪声,随偏压增加而增加,因此选择适当偏压可得到最小噪声值,它对谱线半宽度的贡献可用  $\Delta E_n$  表示。(3) 电荷载流子的俘获效应。耗尽区中俘获中心的存在,使产生在耗尽区中的电荷载流子部分被俘获,这就导致电荷收集不完全。俘获效应反映在能谱上是增加峰的宽度,尤其是  $1/10$  峰高处的宽度(FWTM),造成峰非对称,

及峰位降低, 因此应尽量增加偏压来消除俘获效应对谱线的影响。谱峰的总展宽

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta E_{\text{电}})^2 + (\Delta E_{\text{电}})^2 + (\Delta E_{\text{电}})^2}$$

用脉冲发生器测得的谱线半宽度, 包括了探测器的电容、漏电流及电子学噪声的贡献(由 $\Delta E_{\text{电}}$ 表示)。因此整个 $\gamma$ 谱线半宽度 $\Delta E$ 与脉冲发生器谱线半宽度 $\Delta E_{\text{电}}$ 的平方差值, 反映了载流子产生、收集过程中统计起伏及俘获效应的贡献, 也即反映了锗材料的性能。

对 Si(Li) 探测器一般是用  $\text{Fe}^{59}$  源来测量其谱线特性, 它有两条谱线 (5.9 keV, 6.4 keV), 如图 4(a) 所示。对 HPGe 探测器一般用  $\text{Co}^{60}$  源两条谱流 (1.173 MeV 和 1.332 MeV) 来测量谱线特性, 如图 4(b) 所示。现举  $\text{Co}^{60}$  能谱为例来计算 HPGe 探测器的半宽度,  $\text{Co}^{60}$  二条谱线输出脉冲幅度记录在多道分析器  $N_1$  及  $N_2$  道中, 而 1.332 MeV 峰的半宽度为  $n$  道, 则 1.332 MeV 谱线的半宽度为

$$\text{FWHM} = \frac{1.332 - 1.173}{(N_2 - N_1)} \cdot n(\text{keV})$$

#### 4. 峰康比

用 HPGe 同轴探测器作复杂 $\gamma$ 谱线分析时, 康普顿分布的存在往往会妨碍对弱的低能 $\gamma$ 射线峰的鉴别, 因此引入峰康比的概念来表示这种鉴别特性。峰康比定义为峰的计数  $N_p$  与平均康普顿边缘计数  $N_c$  之比值  $N_p/N_c$ 。对  $\text{Co}^{60}$  1.332 MeV  $\gamma$  射线, 康普顿边缘能区取在 1040—1096 keV 之间, 峰康比与探测器的灵敏体积大小及几何形状有关, 探测器的能量分辨

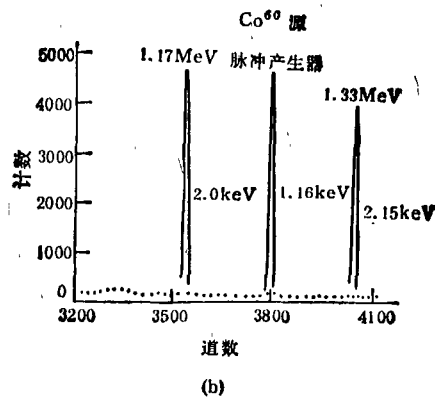
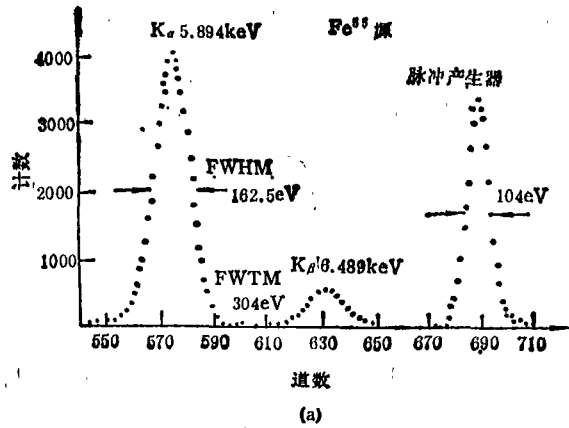


图 4 能谱图  
(a) Si(Li) 能谱图; (b) HPGe 能谱图

率越好, 峰康比也越高, 同轴 HPGe 探测器的峰康比可高达 50—60。

#### 5. 探测效率

探测器的探测效率决定于探测器的灵敏体积、几何形状及探测器的周围介质。人们对全

表 1 HPGe 探测器及 Si(Li) 探测器性能

探测器	材 料	几何形状	窗厚度 ( $\mu\text{m}$ )	可测能区	相对效率或几何尺寸	能量分辨率	峰康比	FWTM/FWHM
P 型 HPGe 同轴	P	单开端同轴	~600	40 keV—10 MeV	5—40% 效率	1.75—2.2 keV (对 1.333 MeV $\gamma$ )	24:1—60:1	1.9—2.0
N 型 HPGe 同轴	N	单开端同轴	0.3 离子注入	3 keV—10 MeV	8—30% 效率	1.8—2.2 keV (对 1.333 MeV $\gamma$ )	30:1—50:1	1.9—2.0
HPGe 平面	P 型或 N 型	平面	0.3 离子注入	3 keV—1 MeV	6—51 mm 直径	165—760 eV (对 5.9 keV X 射线) 480—830 eV (对 122 keV $\gamma$ )		
Si(Li) 平面	锂漂移	平面	0.1	1—30 keV	4—16 mm 直径 3—5 mm 厚	160—250 eV (对 5.9 keV X 射线)		

(下转第 742 页)