

第五章 半导体探测器

董明义

dongmy@ihep.ac.cn

目 录

- § 5-1 半导体探测器基础
- § 5-2 半导体探测器种类
- § 5-3 半导体探测器参数
- § 5-4 半导体探测器的应用简介
- § 5-5 半导体探测器在高能物理中的应用
- § 5-6 半导体探测器的发展

§ 5-1 半导体探测器基础

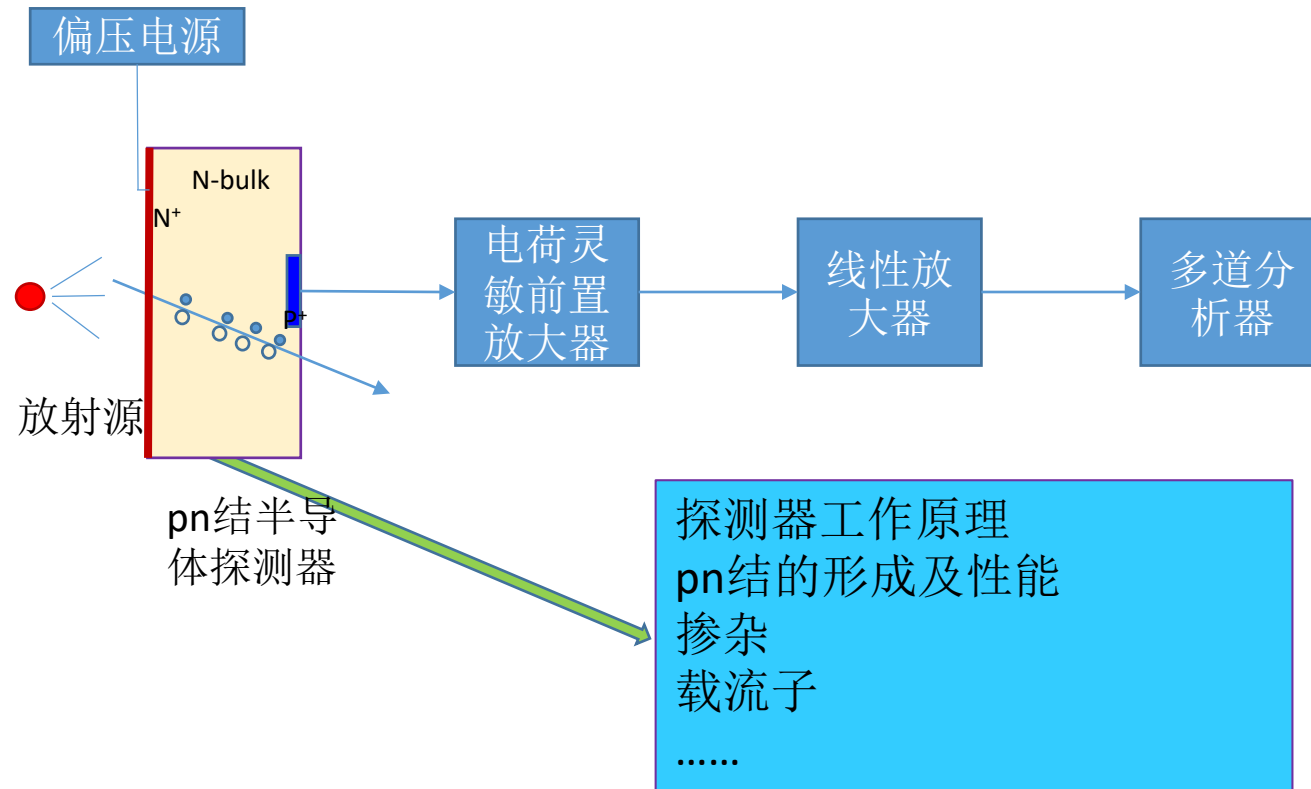
- 一、半导体的能带
- 二、本征半导体
- 三、半导体掺杂
- 四、电荷载流子
- 五、p-n结
- 六、半导体探测器

引言

- 日常生活中常见的半导体探测器

举例

引言：pn结探测器能谱测量系统



- 与气体和闪烁体探测器一样，半导体探测器也是一种常用的粒子探测器
- 与半导体探测器工作原理相关的基本概念：能带、载流子、掺杂、pn结，.....

一、半导体探测器的能带

1. 导体、半导体、绝缘体

物体导电是物体内部电子在外电场作用下定向运动的结果。由于电场力对电子的作用，使电子的运动速度和能量发生变化。

根据导电能力，物质分为导体、绝缘体和半导体

- 导体体电阻率 ρ : $< 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$
- 绝缘体体电阻率 $> 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$
- 半导体体电阻率 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$

常见的半导体材料：硅（Si）、锗（Ge）、化合物半导体

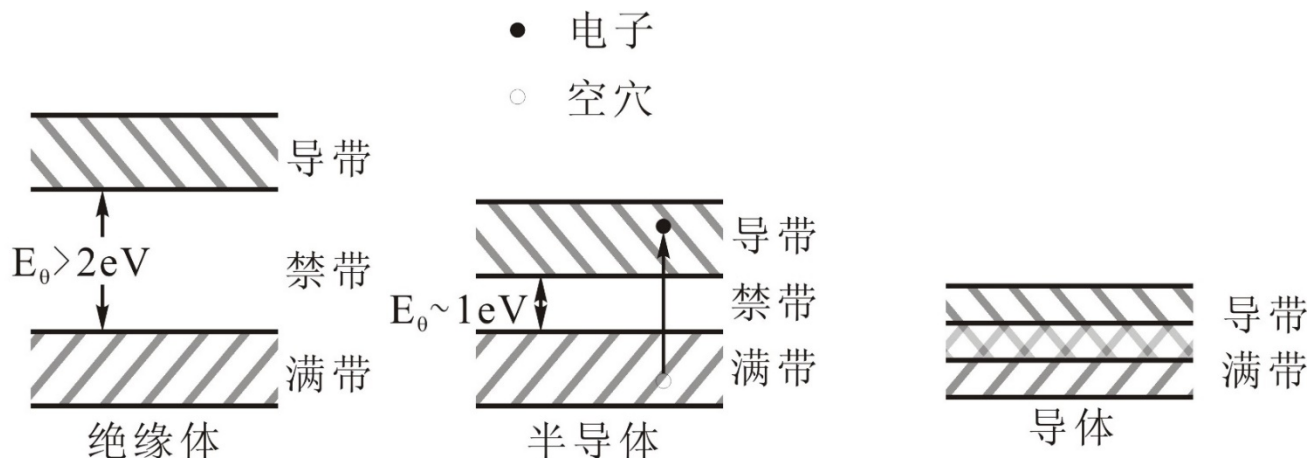
晶体形式：单晶、多晶，半导体探测器大多是单晶

一、半导体探测器的能带

2. 导体、半导体、绝缘体的能带

从能带论来看，电子只能存在一定能级上，电子能量变化就是电子从一个能级跃迁到另一个能级上

- 满带：能级已被电子所占满，一般外电场作用时，其电子不形成电流，对导电没有贡献，也称为价带
- 导带：能带被电子部分占满，在外电场作用下，电子从外电场吸收能量跃迁到未被电子占据的能级上去，形成电流，起导电作用
- 禁带：满带和导带之间的禁区称为禁带，其宽度也称为能隙，记做 E_g



绝缘体、半导体和导体的能带图

3. 半导体和绝缘体之间的差别在于禁带宽度不同

导体不存在禁带，满带和导带交织在一起；

半导体禁带较窄， $E_g=0.1\sim 2.2\text{eV}$

（常温下，Si: 1.115eV , Ge: 0.665eV ）

绝缘体禁带较宽， $E_g=5\sim 10\text{eV}$

由于能带取决于原子间距，所以 E_g 与温度和压力有关。
一般禁带宽度大的材料，耐高温性能和耐辐照性能好。

电离能

- 电离能(W): 产生一个电子-离子对所需要的平均能量
- Si、Ge的电离能分别为: 3.62eV和2.84eV, 大约为禁带宽度的3倍
- 气体中产生一个电子-离子对约需30eV, 在闪烁探测器中产生一个光电倍增管第一打拿极的光电子约需要300eV (以NaI(Tl)为例)
- 同样能量的带电粒子在半导体中产生的电子-离子对比气体和闪烁体中大很多
- 半导体的电离能随入射粒子种类及其能量变化不大
- 入射粒子在半导体中损失能量 E 时, 产生的平均电子-空穴对数: $N_{\text{aver}} = E/W$

温度	硅Si的 W	锗Ge的 W
室温300K	3.62eV	2.84eV
低温77K	3.81eV	2.96eV

法诺因子

- 一定能量 E 的入射带电粒子在介质中产生的总电子-空穴对数 N 是有涨落的。
- 半导体中电子-空穴对数 N 服从的分布规律与气体中类似，遵守法诺分布， N 的方差为：

$$\sigma_N^2 = F \cdot N_{aver} = F \cdot E/W$$

F 即为法诺因子，对于Si， $F=0.15$ ，对于Ge， $F=0.13$ （不同文献给的 F 相差很大，实验越精确趋于更小的值）

- 电子-空穴对的相对均方涨落为：

$$\nu_N^2 = \frac{\sigma_N^2}{N_{aver}^2} = \frac{F}{N_{aver}} = F/(E/W)$$

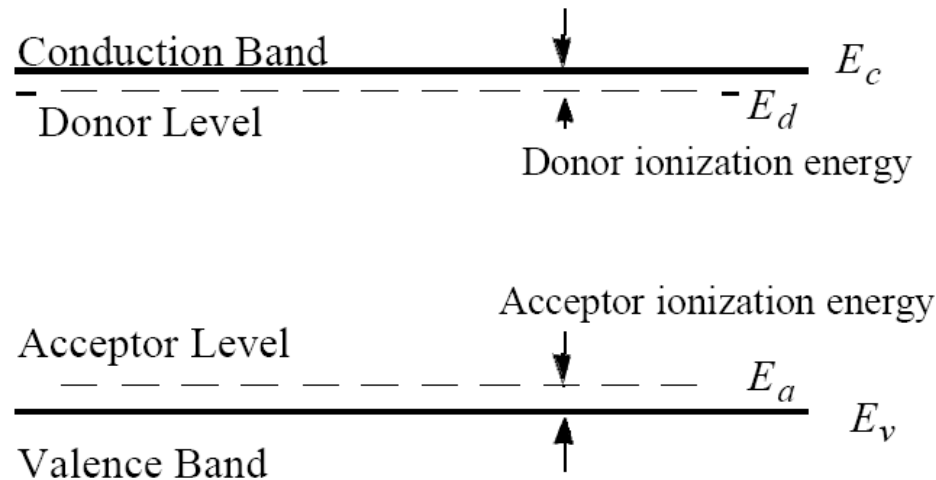
- 半导体中电子-空穴对的相对均方涨落比气体的小10倍以上，半导体探测器可以获得更好的能量分辨率。

二、本征半导体

- 理想的不含杂质的（纯净的）半导体称为本征半导体，导带上的电子数目严格等于满带上的空穴数目， $n=p$
- 一般情况下，半导体的满带完全被电子占满，导带中没有电子。在热力学温度为零时，即使有外电场作用，它们并不导电。但是当温度升高或有光照时，半导体满带中少量电子会获得能量而被激发到导带上，这些电子在外电场作用下将参与导电。同时满带中留下的空穴也参与导电

三、半导体掺杂

- 在半导体材料中总存在一些杂质或晶格缺陷，或者有选择地掺入一些杂质(ppm或更小)。
- 杂质原子在半导体禁带中产生局部能级，影响半导体的性质
- 掺杂后，电子浓度与空穴浓度一般不再相等，浓度较大的载流子称为多数载流子，浓度较小的载流子称为少数载流子



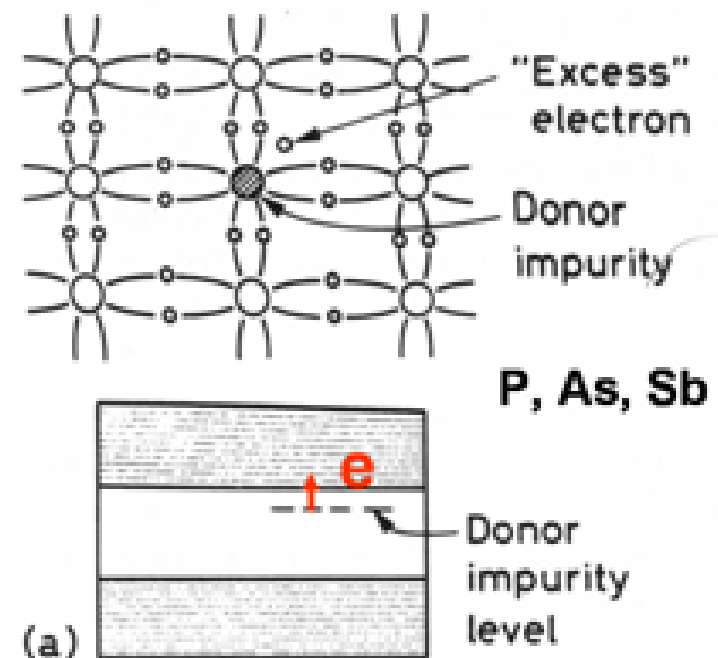
Ionization energy of selected donors and acceptors in silicon

	Donors			Acceptors		
Dopant	Sb	P	As	B	Al	In
Ionization energy, $E_c - E_d$ or $E_a - E_v$ (meV)	39	44	54	45	57	160

施主杂质和施主能级

- 把电子贡献给导带的杂质称为施主杂质；一般为V族元素，如P(磷)、As(砷)、Sb(锑)等；
- 在半导体禁带中形成一些局部能级，即施主能级，能级接近导带底端能量；
- 室温下杂质原子电离，第5个价电子激发到导带中参与导电；
- 价带中并不产生空穴；
- 五价元素原子成为不能移动的正离子中心。

Doping with valence 5 atoms



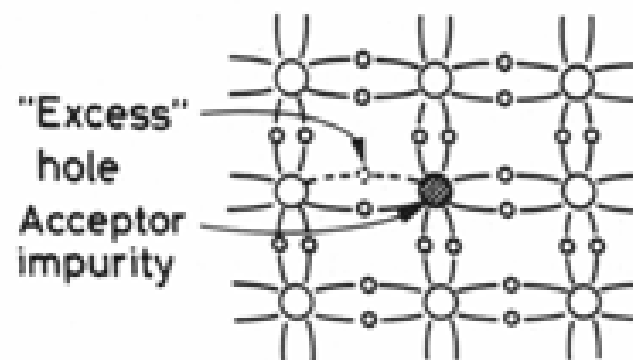
N-type semiconductor

掺有施主杂质的半导体中多数载流子 (majority carriers) 是电子，叫做电子型或n型半导体。

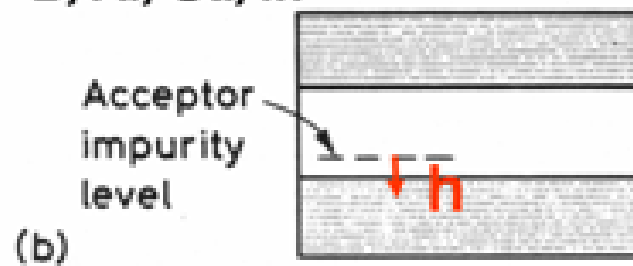
受主杂质和受主能级

- 能接受满带中电子而产生导电空穴的杂质称为受主杂质，常用的III族元素，如B(硼)、Al(铝)、Ga(镓)、In(铟)
- 在半导体禁带中形成一些局部能级，即受主能级，能级接近价带顶端能量；
- 在室温下三价元素原子可以吸收满带中的电子形成不能移动的负离子中心，而在满带中产生空穴参与导电；
- 导带上不产生电子。

Doping with valence 3 atoms



B, Al, Ga, In



P-type semiconductor

掺有受主杂质的半导体中多数载流子是空穴，叫做空穴型或p型半导体。

- 对于掺杂半导体，除了本征激发产生的电子空穴对以外，还有施主杂质提供的电子和受主杂质提供的空穴，所以电子和空穴的浓度不相等。

$$\text{在N型半导体中, } n = n_{\text{施}}, \quad p = \frac{n_i^2}{n_{\text{施}}}$$

$$\text{在P型半导体中, } p = p_{\text{受}}, \quad n = \frac{n_i^2}{p_{\text{受}}}$$

- 结构缺陷

- **点缺陷**：晶格上出现空位或应该的空位处出现了原子。
- **线缺陷**：晶体受应力作用发生错位（沿平面滑移）。
- 晶格缺陷也能俘获或放出电子，相当于在晶体禁带中附加受主或施主能级，也起受主或施主作用。

四、电荷载流子

- 电荷载流子是电子和空穴的统称。
- 半导体内导带中电子浓度 n 与价带中孔穴浓度 p 的乘积为：

导带、价带中的量子态数目

$$n \cdot p = N_c \cdot N_v \cdot \exp(-E_g/kT)$$

- 对于本征半导体，

禁带宽度(eV)

$$n \cdot p = UT^3 \exp(-E_g/kT)$$

绝对温度(K)

每立方厘米体积中电子与空穴的浓度

材料的特征比例系数

玻尔兹曼常数

可见一定温度下， $n \cdot p$ 为常数，取决于禁带宽度 E_g 和温度 T ，与所含杂质无关。

不含杂质的理想本征半导体的载流子浓度：

$$\text{Si: } n \cdot p = n_i^2 = 1.5 \times 10^{33} T^3 \exp\left(-\frac{1.115}{kT}\right);$$

$$\text{Ge: } n \cdot p = n_i^2 = 3.1 \times 10^{33} T^3 \exp\left(-\frac{0.665}{kT}\right)$$

室温下 ($T=300\text{K}$) 本征半导体载流子浓度：

$$\text{Si: } n = p = 1.45 \times 10^{10} / \text{cm}^3;$$

$$\text{Ge: } n = p = 2.4 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

均远小于金属的电子浓度 (约 $10^{22} / \text{cm}^3$)，载流子浓度小且随温度变化，是半导体与金属的主要差别

补偿效应

- 补偿效应：半导体的类型可以通过掺杂施主杂质或受主杂质而改变。如对于n型半导体， $n > p$ ，由于 $n \cdot p$ 为常数，加入的受主杂质足够多，可以使 $p > n$ ，使半导体转化为p型。对于p型半导体中掺入施主，也可以使其转化为n型半导体。
- 半导体中施主杂质和受主杂质浓度相当时，这种材料称为完全补偿材料或准本征半导体，其载流子浓度： $n = p$

载流子的性质

(1) 载流子在电场中的迁移:

外加电场时, 电子和空穴在外加电场作用下运动, 方向相反,
该运动为热运动与电场下的漂移运动的合成

➤ 若电场较低时, 漂移速度 u 正比于外加电场 E

$u = eEt/2m = \mu E$, $\mu = et/2m$ 为迁移率, t 为载流子两次热运动碰撞之间的时间, m 为载流子的质量

气体探测器, 电子的迁移率远大于正离子 (三个量级);

半导体中, 电子和空穴的迁移率差异不大, 且与温度相关, 温度越低, 迁移率越高。

- 当电场逐渐增高时, 漂移速度随电场增加变慢, 并当场强达到一定值时 (对于电子: E 达到 10^5 V/cm , 对于空穴, E 需达到 $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$), 漂移速度达到饱和而与电场增加无关。
- 半导体探测器一般都工作在非常高的电场条件下, 以得到电荷载流子的饱和速度: $\sim 10^7 \text{ cm/s}$ 。

如: 当芯片厚度为 0.01 cm 时, 收集时间 $\sim 1 \text{ ns}$ 。

具有非常快的时间响应。

(2) 半导体的电阻率

- 半导体的电阻率 ρ 由载流子浓度和漂移速度决定,可以推导出

$$\rho = \frac{1}{e(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)}$$

- 对于n型半导体, $n \gg p$, $\rho \approx \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_n} \approx \frac{1}{e \cdot N_d \cdot \mu_n}$, 其中 N_d 为施主杂质浓度
- 对于p型半导体, $n \ll p$, $\rho \approx \frac{1}{e \cdot p \cdot \mu_p} \approx \frac{1}{e \cdot N_A \cdot \mu_p}$, 其中 N_A 为受主杂质浓度
- 载流子浓度越大, 迁移率越大, 电阻率将越小。由于 $n \cdot p$ 为常数, $n = p$ 时, $n + p$ 最小, 因此通过补偿效应可以提高掺杂半导体的电阻率。
- 半导体温度降低时, 载流子浓度下降, 材料的电阻率将会有所提高
- 300K时, 本征Si的 $\rho = 2.3 \times 10^5 \Omega \cdot cm$, Ge的 ρ 为 $47 \Omega \cdot cm$, 实际材料中远小于这个值

(3) 载流子的复合和俘获

半导体内，自由载流子不断产生与消失，处于动态平衡中。载流子的复合和俘获主要有以下两种情况：

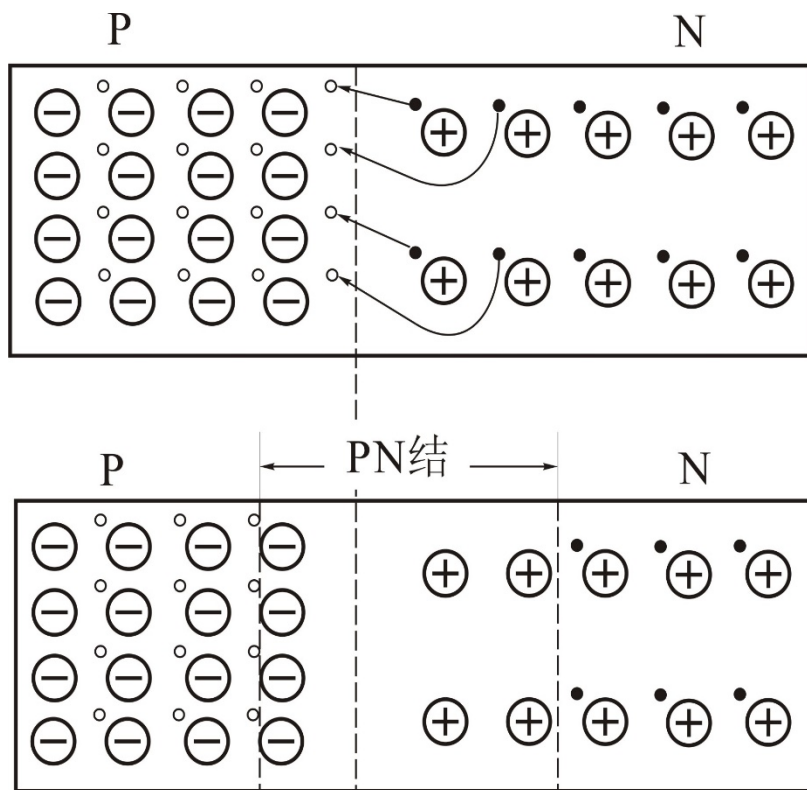
- 1) 导带上的电子直接被满带中空穴俘获；
- 2) 通过晶体中杂质和晶格缺陷在禁带内的中间能级——复合中心和俘获中心进行

(4) 载流子寿命

- 载流子由产生到复合消失或者被俘获前可以在半导体中自由运动的平均时间为载流子的寿命 τ ，为半导体材料质量的一项重要指标。
- 在外加电场 E 时，只有漂移距离 $L = \mu E \tau$ 大于灵敏体积的长度，才能保证载流子的有效收集
- 载流子的俘获由杂质和晶格中的缺陷所造成，半导体内杂质和晶格缺陷越多， τ 越小。
- 通过补偿，半导体的电阻率可以提高到与本征半导体相同，但杂质增加，载流子寿命却下降。在高纯度的Si或Ge晶体中，载流子寿命可达约1ms。

五、p-n结(p-n junction)

- 在一块n型（或p型）半导体单晶上，用适当工艺把p型（或n型）杂质掺入其中，使这块单晶的不同区域分别具有n型和p型的导电类型，在两者的交界面上就形成了pn结。



Pn结的形成及各物理量的分布

- 结合前，n区的电子多，p区的空穴多。
- 结合后，电子由n区向p区扩散与空穴复合；空穴由p区向n区扩散与电子复合。扩散的结果形成pn结。
- 在PN结区，电子空穴很少，剩下的杂质正负离子形成空间电荷区，其内建电场方向由n区指向p区，阻止电子、空穴继续扩散，并造成少数载流子的反向漂移运动。当扩散运动和反向漂移运动达到平衡时，p区或n区的电子空穴浓度就不再变化。
- 这个由不可移动的杂质离子组成的空间电荷区，即pn结区，对电导率没有贡献，而载流子的密度非常低，亦称耗尽区，阻挡层，势垒区。耗尽区的电阻率比本征半导体的电阻率高得多

流过p-n结的电流

- 在平衡情况下，pn结对外不会有宏观电流，但在结区仍存在从n到p，以及从p到n的电流，并处于动态平衡。

- 反向电流**

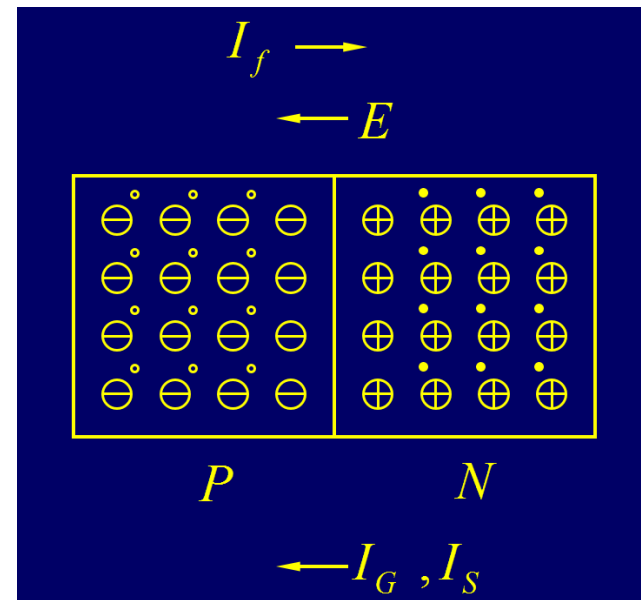
- 由于热运动在势垒区产生的电子-空穴对，在内建电场作用下漂向两边，形成由n到p的电流 I_G ， I_G 取决于结区的温度与宽度。

$$I_G = \frac{A \cdot n_i}{2\tau} \cdot W_d \cdot e, W_d \text{ 为结区宽度, } A \text{ 为结区面积}$$

- 少数载流子（n区中的空穴，p区中的电子）也会扩散，它们一旦扩散进入势垒区，马上会在内建电场作用下漂向对方区域，会形成n到p的电流 I_S
- I_G 和 I_S 的方向与内建电场方向一致，称为反向电流（相对pn结而言，通常将由p到n称为正向，由n到称为反向）

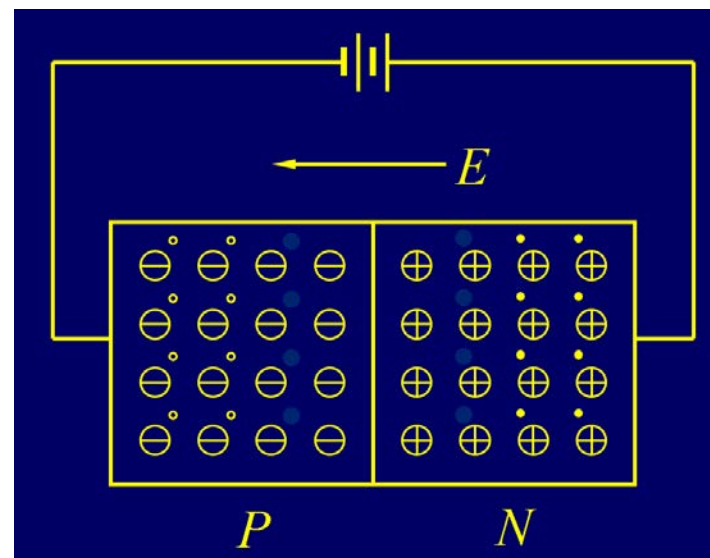
- 正向电流**：势垒区的电场阻碍了多数载流子的扩散，但部分能量较高的多数载流子（电子or空穴）仍会穿过势垒区扩散到对方区域，形成正向电流 I_f

- 达到平衡时**， $I_f = I_G + I_S$



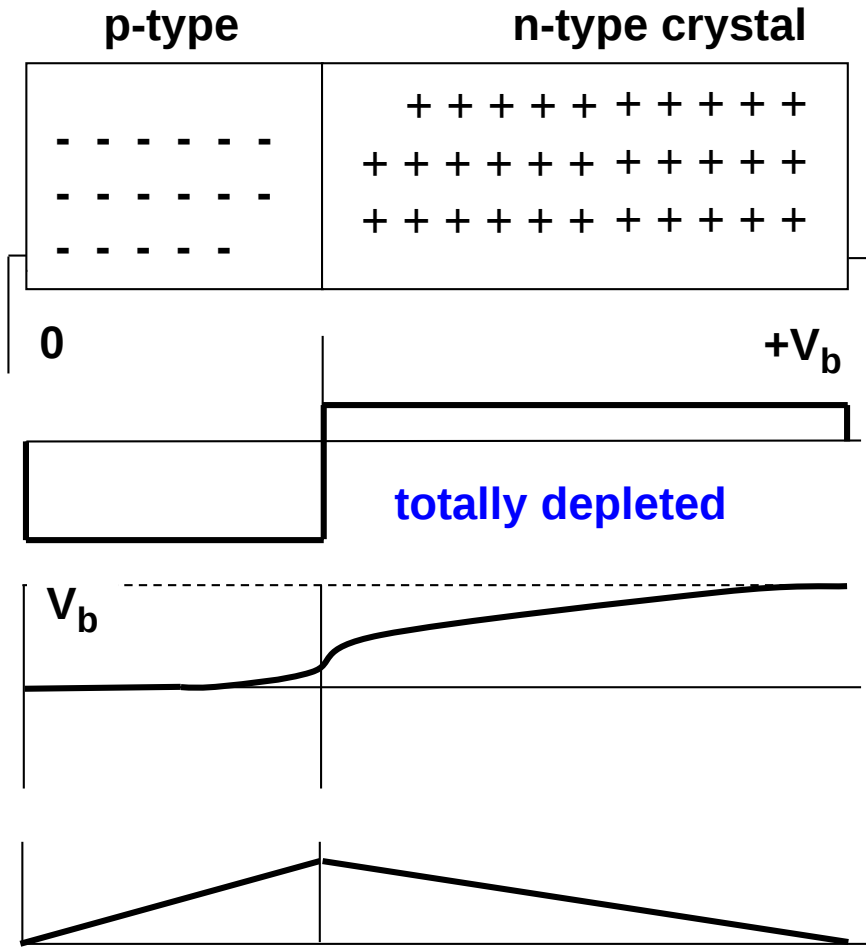
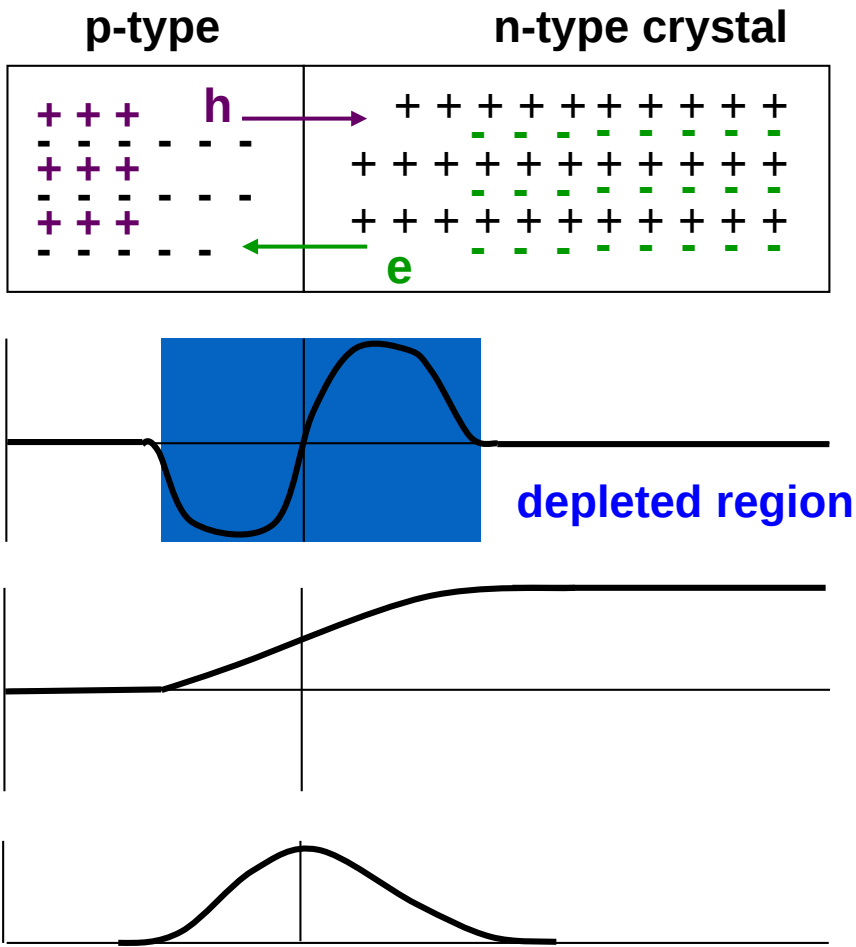
外加电场下的p-n结

- 在p-n结上加反向电压，由于结区电阻率很高，电位差几乎都降在结区。
- 反向电压形成的电场与内建电场方向一致，使耗尽层内电场增加，势垒增高。耗尽层内的电场是由界面两边的空间电荷体现出来的，由于施主或受主杂质形成的正负电荷中心不能移动，因此必然通过耗尽层变宽来增加空间电荷。
- 外加电场使结区宽度增大。反向电压越高，结区越宽。



- 在外加反向电压时的反向电流：
 - 少数载流子的扩散电流，结区面积不变， I_S 不变；
 - 结区宽度增加，体积加大，热运动产生电子-空穴对增多， I_G 增大；
 - 加反向电压后，n区电位高于p区，出现了以表面漏电为主的漏电流 I_L ，方向由n区指向p区。
 - 反向电压使结区势垒增高，多数载流子的扩散减少，则正向电流 I_f 降低，可以忽略。
 - 在反向电压作用下，出现了宏观由n到p的反向电流，会掩盖低能粒子产生的小信号。尤其是漏电流 I_L 更重要，常用表面沟槽或保护环，以及防止表面污染来降低表面漏电流 I_L 。

耗尽区与全耗尽



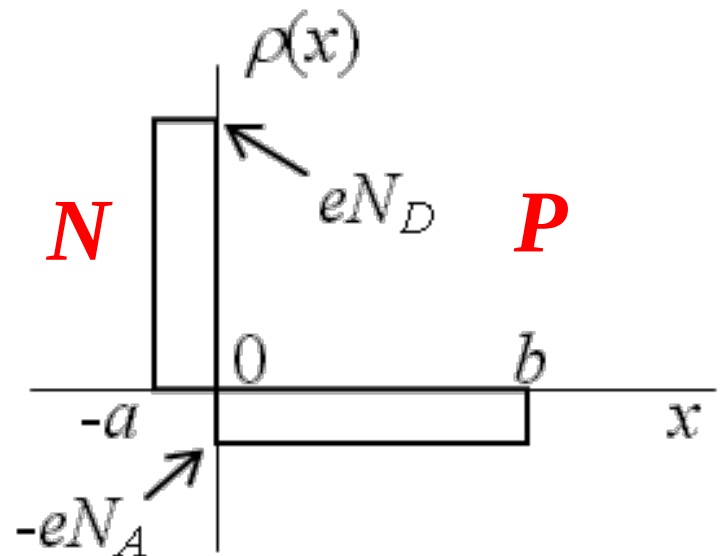
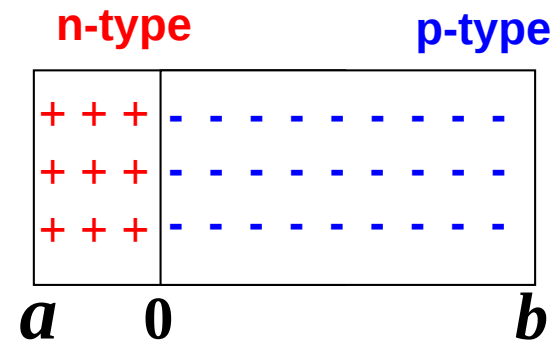
结区的电荷密度

结区空间电荷密度为：

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & (-a < x \leq 0) \\ -eN_A & (0 < x \leq b) \end{cases}$$

N_D 和 N_A 分别代表施主杂质和受主杂质浓度； a, b 则代表空间电荷的厚度，耗尽状态下结区总电荷为零：

$$bN_A = aN_D$$



结区的电场电势分布

电场分布：

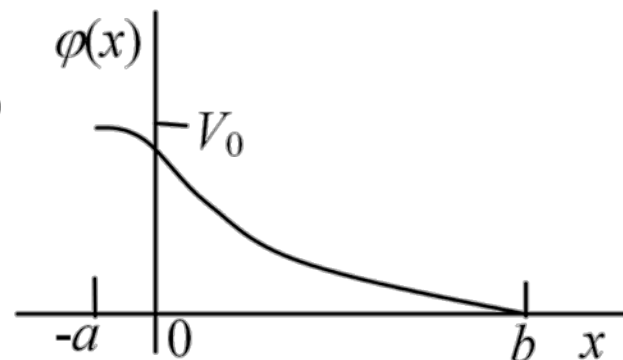
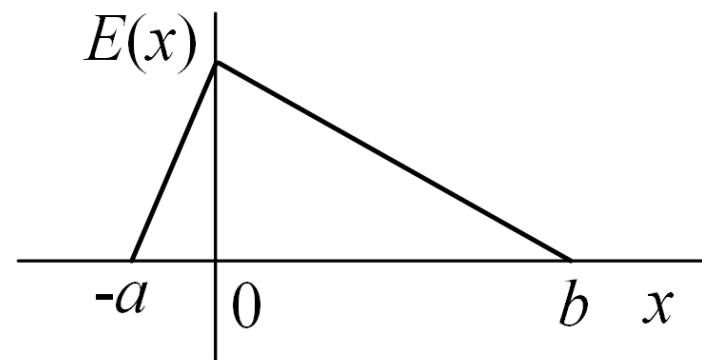
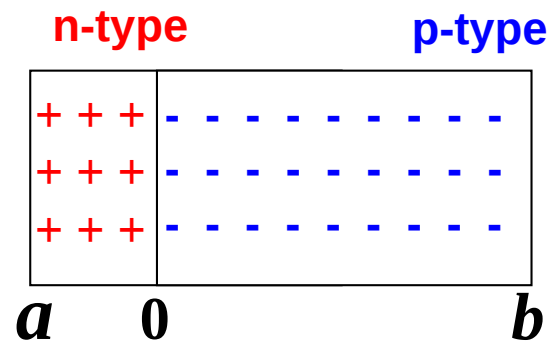
$$E(x) = \frac{eN_D}{\varepsilon}(x+a) \quad (-a < x \leq 0)$$

$$E(x) = \frac{eN_A}{\varepsilon}(b-x) \quad (0 < x \leq b)$$

对电场积分，可以得到势垒分布：

$$\varphi(x) = -\frac{eN_D}{2\varepsilon}(x+a)^2 + V_0 \quad (-a < x \leq 0)$$

$$\varphi(x) = \frac{eN_A}{2\varepsilon}(x-b)^2 \quad (0 < x \leq b)$$



结区的宽度与外加电压的关系

当 $x = 0$ 时， p 区和 n 区的电位应相等，即

$$V_0 - \frac{eN_D}{2\varepsilon}a^2 = \frac{eN_A}{2\varepsilon}b^2$$

$$\text{又因： } N_D a = N_A b \longrightarrow (a + b)b = \frac{2\varepsilon V_0}{eN_A}$$

耗尽区的总宽度： $W_d = a + b$

当 $N_D \gg N_A$ 时， $b \gg a$ 。则 $W_d \approx b$

当 $N_A \gg N_D$ 时， $a \gg b$ 。则 $W_d \approx a$

一般可写成： $W_d = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_i} \right)^{1/2} \propto \sqrt{V_0}$

N_i 为掺杂少的一边的杂质浓度

结区宽度的限制因素

- 受材料的击穿电压的限制: $W_d \propto \sqrt{V_0}$
- 受暗电流的限制, 因为: $I_G \propto W_d$

结电容随工作电压的变化

- 根据结区电荷随外加电压的变化率, 可以计算得到结区电容:

$$C_d = \frac{\varepsilon}{W_d} = \left(\frac{\varepsilon e N_i}{2V_0} \right)^{1/2} \text{ pF/cm}^2 \quad C_d \propto \frac{1}{W_d} \propto \frac{1}{\sqrt{V_0}}$$

- 反向电压越高, 半导体材料的电阻率越高, 则结区电容越小。结区电容随外加电压变化而变化, 外加电压的不稳定可以影响探测器输出电压幅度的稳定性。

p-n结的击穿电压

- 反向电压过高，可能造成p-n结的击穿。
 - 齐纳击穿：电场同共价键电子的相互作用使电子从价带向导带移动而变成游离状态，电子-空穴对数目增多而造成击穿
 - 雪崩击穿：载流子经过势垒时，在强电场作用下获得足够高的能量，以致在碰撞过程中可使价带中的电子跃入导带，产生新的电子-空穴对，使电子-空穴对数目增多，反向电流剧增。
- 电阻率越高，耗尽层就越宽，电场越弱，不易击穿。
- 当掺杂不均匀或内部缺陷造成半导体内电阻率各处不同时，局部电场会很高，容易发生击穿。
- 击穿时，反向电流急剧增大，可能造成破坏性的后果。
- 加保护电阻（在偏压上串联保护电阻），限制电流，可防止探测器的击穿损坏。

六、怎样构成一个半导体探测器？

- 理想的基于电离辐射的探测器必须满足两个条件：
 - 在没有辐射（包括本底）穿过灵敏体积时不会产生信号
要求：介质电阻率足够大，输出信号仅由辐射引起
 - 带电粒子穿过灵敏体积产生的电荷在电场作用下能产生定向漂移运动，而且在被电极收集前没有明显损失
要求：介质内电荷可以运动并且有足够长的寿命，这样才能输出信号，并可能反映辐射的能量

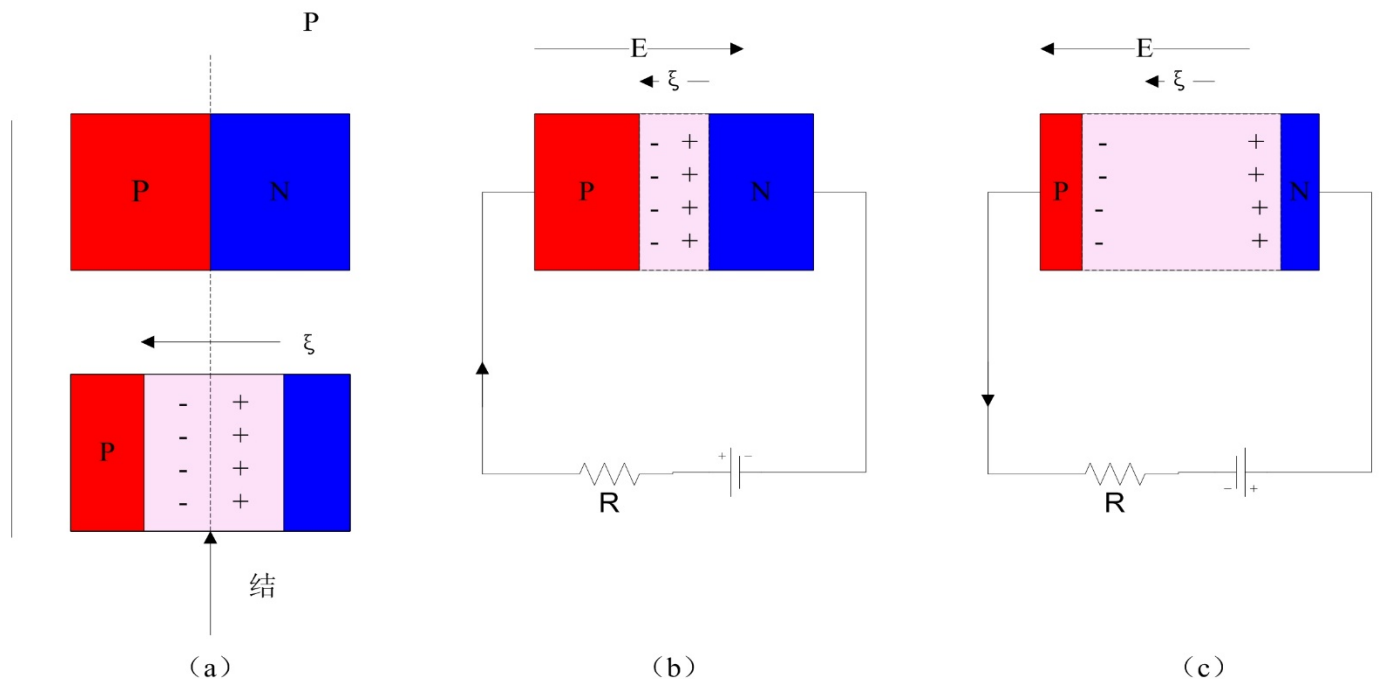
半导体探测器

半导体pn结可作为灵敏区

- 1) 在pn结区可移动的载流子基本被耗尽，只留下电离了的正负电中心，对电导率无贡献，其具有很高的电阻率。
- 2) pn结加上一定负偏压，耗尽区扩展，可达全耗尽，死层极薄，外加电压几乎全部加到pn结上，形成很高电场。
- 3) 漏电流很小，有很好的信噪比。
- 4) 当有带电粒子通过时，产生的电子-空穴对，在强电场的作用下，很快地迁移出耗尽区，在电极上产生信号。

半导体探测器的灵敏区

- 当pn结不加偏压时，能起到一定的探测器作用，但性能很差，内建电场低，不利于收集；耗尽区薄，信噪比差
- 当pn结加正向偏压时，加很低的电压，也会有很大的电流，信号将被淹没，无法作为探测器
- 加反向电压，n区接正，p区接负，外加电场方向与内建电场方向相同，使耗尽层增厚，漂移运动增强。当带电粒子穿过时产生电子-空穴对，在高电场下分别向正负电极漂移，产生信号。信号幅度正比于电子空穴对数目，正比于入射粒子损失能量。所以加反向偏压的pn结就是结型半导体探测器的灵敏区。



半导体探测器的主要特点

- 优点:

- 1) 非常好的位置分辨

- 这是半导体探测器中硅微条探测器最突出的特点。它的位置分辨率是目前应用的各种探测器中最高的，目前可做到**1.4 μm** 。
 - 主要因为固体的密度比气体大**100** 倍左右，带电粒子穿过探测器，产生的电子-空穴对(e-h) 的密度非常高，大约为**100e-h/ μm** 。
 - 另外由于现代半导体技术工艺，光刻技术及高集成度低噪声读出电子学的飞速发展，每个读出条可对应一路读出电子学，更有利于空间分辨率的提高。

2) 很高的能量分辨率

$$Re = 2.354 \sqrt{\frac{F}{N_{aver}}} = 2.354 \sqrt{\frac{F \cdot W}{E}}$$
$$\Delta E = E \cdot Re = 2.354 \sqrt{F \cdot E \cdot W}$$

- ΔE 称为能量分辨半高宽
- 半导体探测器的能量分辨率比气体探测器大约高一个数量级, 比闪烁计数器高得更多。
- 这是因为在硅半导体中电离产生一对电子-空穴对只需要3eV左右的能量, 而气体中产生一对离子对所需能量大约为30eV, 塑料闪烁探测器在光阴极上产生一个光电子需要的能量大约为300eV。带电粒子在硅半导体中的能量损失也很高, 在硅晶体中, 能量损失大约390eV/ μm 。因此, 同样能量的带电粒子在半导体中产生的电子-空穴对数要比气体中产生的离子对高一个数量级以上。这样电荷数的相对统计涨落也比气体小很多。
- 法诺因子F也小。
硅 $F \approx 0.15$, 锗 $F \approx 0.13$; 气体 $F \approx 0.4$; 闪烁体 $F=1$

3) 能量线性很好

半导体（如：Si或Ge）的平均电离能 W 与入射粒子的能量无关，对不同类型辐射 W 值的变化也非常小，只要所产生的电子空穴对全部被收集，探测器输出脉冲与入射粒子沉积能量成正比。半导体探测器对各种粒子都有良好的能量线性。

由于半导体的禁带宽度随温度变化，因此 W 值随温度有微小变化，好的能量线形要求半导体探测器工作温度相对稳定。

4) 非常快的响应时间

在pn结探测器中，载流子收集时间非常快，约1~10ns，最终决定了输出电压脉冲信号的上升时间。因此，可以实现高计数率，可超过 $10^8/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 。pn结探测器的时间响应特性在常用探测器中仅次于有机闪烁体。

5) 体积可做得很小

由于硅半导体密度大, 有一定的刚度, 它可以做得很薄并能自身支持, 典型的厚度是 $300\mu\text{m}$ 左右, 当带电粒子穿过时, 大约可产生 3.2×10^4 电子-空穴对。有的还可做得更薄, 整个探测器可以做得很小。

6) 抗磁场性能好

对磁场($B < 1\text{T}$)不灵敏。

- 缺点：对辐射损伤比较灵敏

- 半导体探测器的辐照损伤很严重。因为辐照在半导体中会造成晶格缺陷，使载流子寿命下降，同时辐照还能改变探测器的表面性能，致使半导体探测器的漏电流增大，性能下降。
- 辐射损伤与辐射种类、剂量率以及辐照时间和条件有关。
- 各国科学家就此问题从技术上正在进行不断地改进提高。

§ 5-2 半导体探测器的种类（传统）

- 一、pn结型探测器
- 二、锂漂移型探测器
- 三、高纯锗探测器
- 四、化合物半导体探测器
- 五、特殊类型半导体探测器

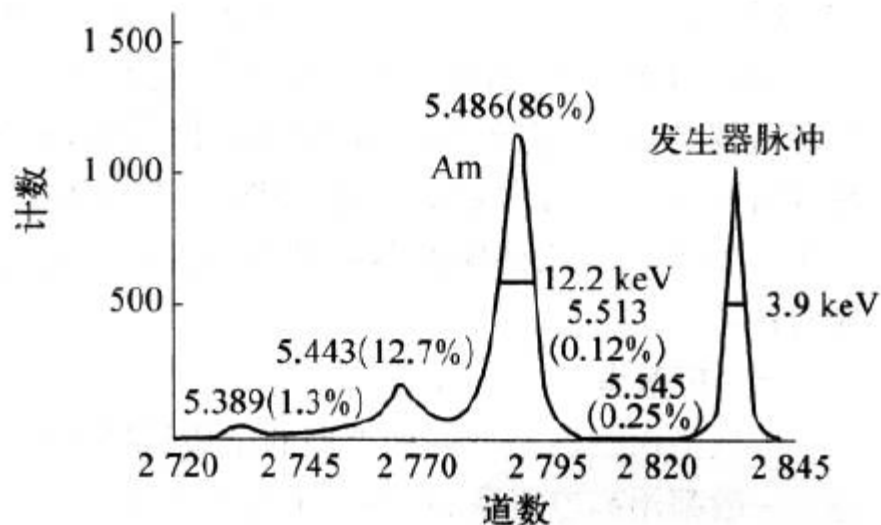
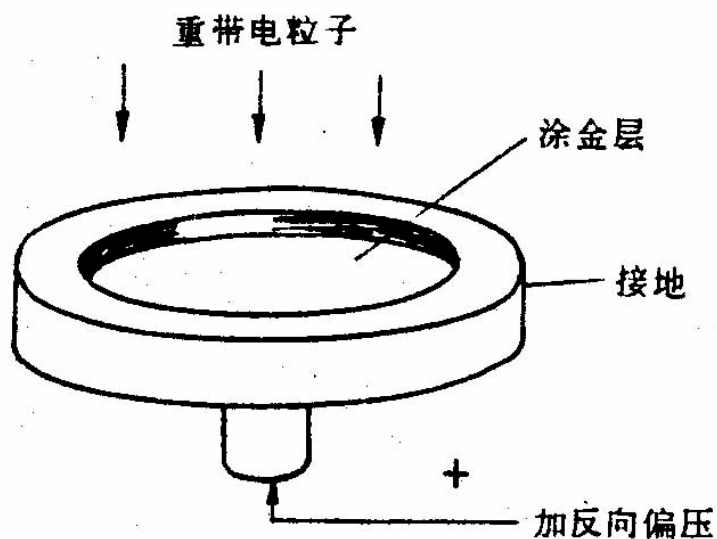
一、pn结型探测器

1. 扩散型

- 将一种类型的杂质扩散到另一种类型的半导体内形成pn结。通常是把五价磷在高温下（800—1000°C）扩散到p型硅中，扩散深度由调节温度和时间来控制。从而在p型硅表面形成高浓度的N⁺层，在p型硅和n型硅交界处就得到了pn结。
- 结区厚1μm左右，电极和信号引出的欧姆接触利用真空沉积或化学镀等方法实现。
- 优点：漏电流小，对辐射损伤不灵敏。
- 缺点： N⁺层相当于入射窗，不属于耗尽层，入射粒子在其中损失能量但不对输出信号产生贡献。死层较厚，不易获得大面积pn结，生产过程中高温处理，导致载流子寿命减小，影响能量分辨率。

2. 面垒型

- 金硅面垒探测器：Si表面进行腐蚀后蒸上一薄层金作为电接点，在金层与Si间生成一氧化层，并形成表面势垒。
- 优点：窗薄，噪声低，不经高温处理，能量分辨率高，能量线性响应好。工艺简单，成品率高，易于制得大面积探测器。
- 主要用于测量质子、 α 粒子和重离子等带电粒子。



3. 离子注入型

- 利用加速器产生一定能量（5—100keV）的杂质正离子束，直接穿透半导体表面形成pn结。常用硼离子束轰击n型硅，或用磷离子束轰击p型硅，调节离子束能量和强度，得到所需的掺杂深度和浓度。
- 优点：载流子寿命受工艺影响小、性能稳定。入射窗薄，可至30nm~40nm。
- 缺点：能量分辨率介于扩散型和面垒型之间。入射离子束产生强的辐射损伤，形成大量复合和俘获中心。使用较低能量的离子束和在一定温度下退火，可以消除这一缺陷。

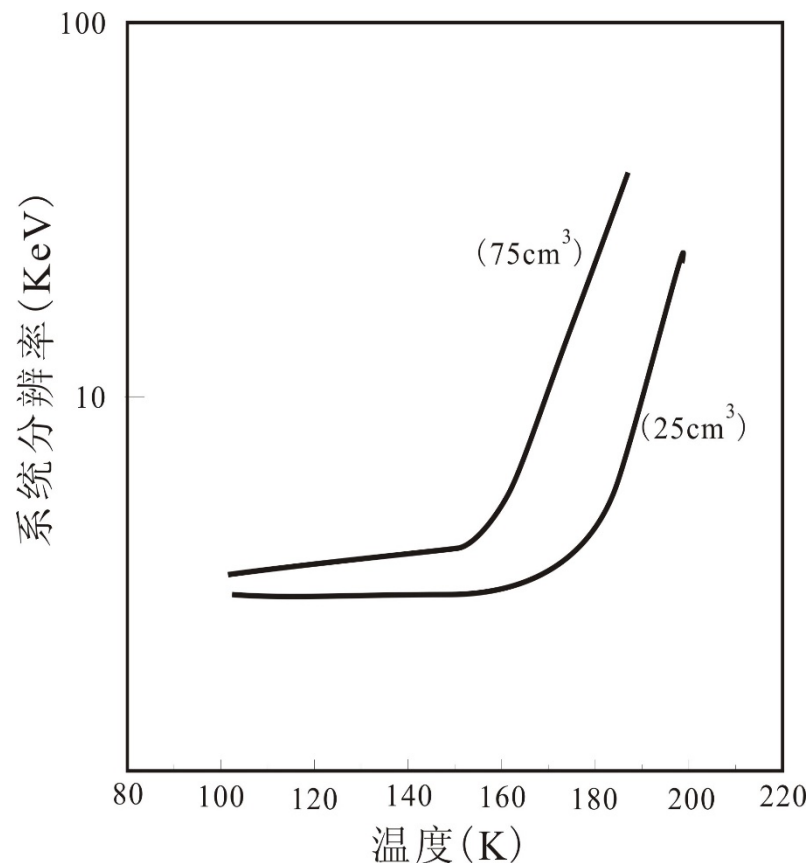
二、锂漂移型探测器

- 最大优点是灵敏层厚，可达0.5—6mm，适于用作 γ 和x射线测量。
- 由于锂在Si和Ge中的电离能较低，在室温下锂全部电离，电子进入导带内起施主作用。 Li^+ 半径小于Si和Ge的晶格距离很多，在电场作用下很容易进入半导体内部，向深处扩散。 Li^+ 和p型受主杂质B $^-$ 由于静电作用形成稳定的 $(\text{Li}^+ \text{B}^-)$ 对，达到补偿的目的。形成电阻率很高的本征层(I型，亦称I区)，本征层电场很强，是探测器的灵敏区。
- 锂漂移型探测器是准本征材料和pn结的组合，常称作NIP探测器。
- 硅锂探测器Si(Li)，可在室温下工作，在液氮温度下性能改善。主要探测 β 射线和低能 γ 射线， $E_\gamma < 100 \text{ keV}$ 。
- 锗锂探测器Ge(Li)，必须在液氮温度下工作。
- 锂漂移型探测器必须在低温下加反偏压存储，否则锂离子在室温下有相当的迁移率而会使性能变坏。

三、高纯锗探测器 (HPGe)

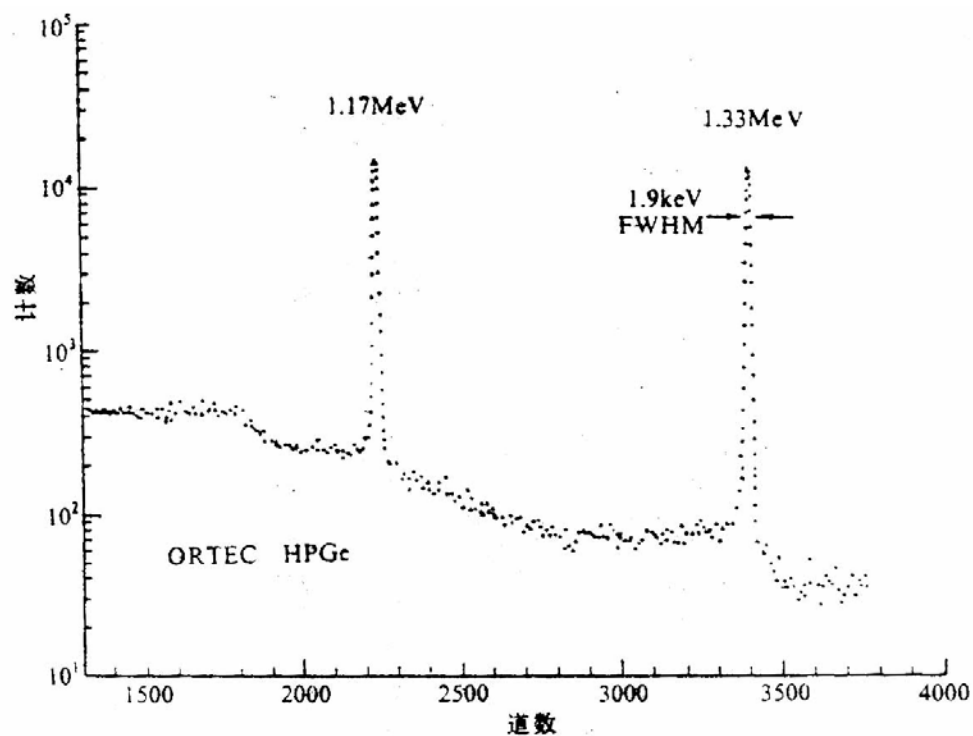
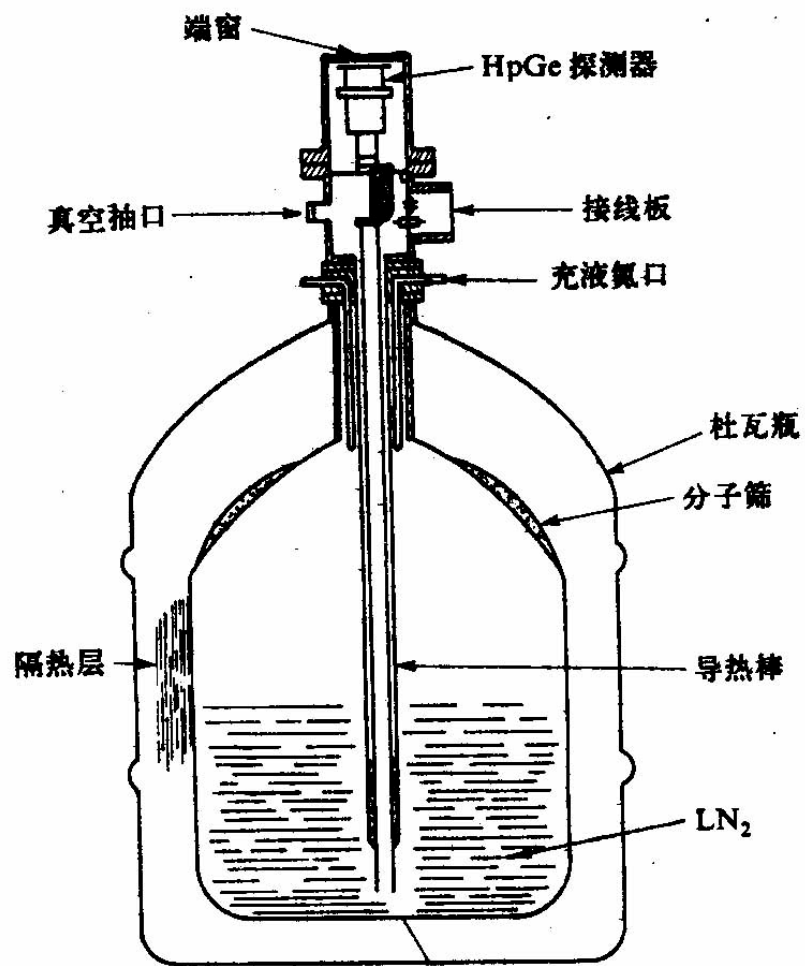
$$W_d = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_i} \right)^{1/2} \propto \sqrt{V_0}$$

- 对于快电子或 γ 穿透能力强的辐射探测要求增大探测器的灵敏体积
- 由耗尽层宽度可知，降低半导体杂质浓度 N_i 可以提高耗尽层宽度
- 利用纯度很高的锗制成pn结，耗尽层随反向偏压的增加而增厚。当偏压很高时，整块晶体都成了耗尽层。
- 有平面型，或具有环状深沟的槽型结构，也可是同轴型。
- 优点：易制备成大灵敏体积的探测器，可在室温下储存，在液氮温度下(77K)工作。它的能量分辨率和对 γ 射线的探测效率同Ge(Li)探测器。



高纯锗探测器的能量分辨率与温度关系

高纯锗探测器



why HPGe detector?

- 锂漂移探测器需要低温保存与使用
- 生产周期(锂漂移时间)长：30～60天
- 1980年之后，Ge(Li)已经停止生产，并被HPGe所取代
- HPGe技术产生于70年代中期
- Ge的纯度可以达到PPT (10^{-12})
- Si的纯度难以做到这个纯度（也许是熔点原因？
Si:1414 °C , Ge:938°C)

高纯锗探测器pn结的构成

- 采用高纯度的p型Ge单晶
- 一端表面通过蒸发扩散或加速器离子注入施主杂质(如磷或锂)形成 N区 和 N^+ ，并形成pn结。
- 另一端蒸金属形成 P^+ ，并作为入射窗。两端引出电极。
- N^+PP^+ 结构

因为杂质浓度极低， $n \sim 10^{10}$ 原子/cm³，相应的电阻率很高，形成高纯锗(HPGe)探测器。空间电荷密度很小，P区的耗尽层厚度大，可使 W_d 达到厘米量级 ($> 10mm$)

- 1) 能量分辨半高宽 $\Delta E = \sqrt{\Delta E_1^2 + \Delta E_2^2 + \Delta E_3^2}$

$\Delta E_1 = 2.36\sqrt{F \cdot W \cdot E}$ 为载流子数的涨落。

$\Delta E_2 = 2.36W(ENC)$ 为漏电流和噪声；

ΔE_3 为载流子由于陷阱效应带来的涨落，通过适当提高偏置电压减小。

- HPGe, Ge(Li)同轴型探测器用于 γ 射线探测，常以 ^{60}Co 能量为1.332MeV的 γ 射线为标准，一般指标约：

$$\Delta E = 1.5 \sim 2.0\text{keV}$$

2) 探测效率

以 $\Phi 3$ 英寸 $\times 3$ 英寸的NaI(Tl)晶体为100%，用相对效率来表示。以85cm³的HPGe为例，探测效率为19%。

3) 峰康比

$P = \text{全能峰最大计数率} / \text{康普顿坪台的最大计数率}$
与FWHM以及体积有关，可达30~40，采取反符合方法后可达600~800

4) 能量线性：非常好

5) 时间特性 电流脉冲宽度可达 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ s

四、化合物半导体探测器

Si、Ge禁带宽度小，Ge必须工作在低温条件下，Si用于低噪声测量时也需要低温条件， γ 谱仪希望有高的探测效率及峰总比，Si、Ge原子序数较低，因此产生了化合物半导体探测器。

1. CdTe、CdZnTe探测器

- 优点：原子序数高，禁带宽度大，电阻率高，非常适合探测10—500keV的光子，可以在室温下工作。体积为1—2cm³的晶体可探测能量1MeV以上的光子，用于x、 γ 能谱测量。对⁵⁷Co的122keV γ 射线的半宽度室温时为5.9keV。
- 缺点：载流子寿命不够大，俘获长度较小，造成电荷收集不完全，能谱性能受限制。
- 性能参数：

半导体种类	CdTe	CdZnTe
原子数	48,52	48,30,52
密度(g.cm ⁻³)	5.85	5.81
禁带宽度(eV)	1.44	1.6
电阻率($\Omega\cdot\text{cm}$)	10 ⁹	(1-5) $\times 10^{10}$
$(\mu\tau)_e \times 10^{-3}\text{cm}^2\text{V}^{-1}$	0.1-2	0.8-9
$(\mu\tau)_h \times 10^{-5}\text{cm}^2\text{V}^{-1}$	1-10	0.1-1

2. GaAs探测器

原子序数为**31**和**33**，与锗相近， $E_g=1.45\text{eV}$ 。主要用作室温 β 和 γ 谱仪。对 ^{57}Co 的**122keV** γ 射线的半宽度室温时为**3.8keV**。

3. HgI_2 探测器

原子序数为**80**和**53**，比锗大， $E_g=2.13\text{eV}$ 。主要用作室温或高温 γ 谱仪。对 ^{57}Co 的**122keV** γ 射线的半宽度室温时为**4.3keV**。可以工作在**200—400°C**下。

	$\bar{Z}$	E_g	w_0	FWHM	大小
CdTe	50	1.47eV	4.43eV	650eV	$\Phi 6 \times 1.5$
HgI_2	62	2.13	6.50	500	$\Phi 5 \times 2.0$
GaAs	32	1.43	4.20		

这些化合物材料的探测器均可在常温下使用！

五、特殊类型半导体探测器

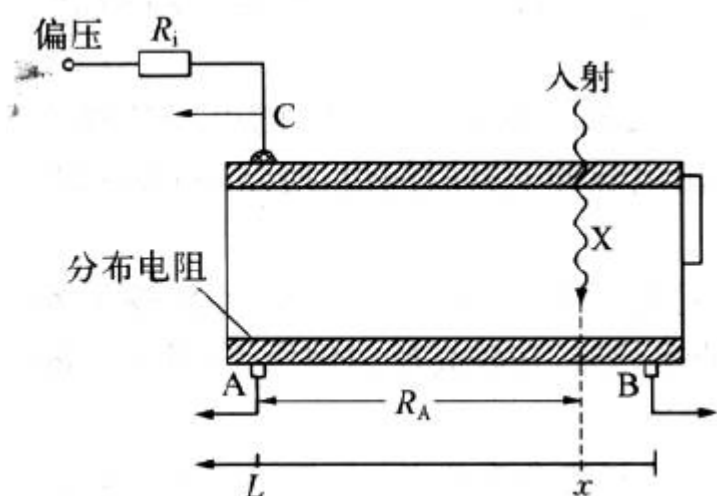
- 全耗尽探测器

其非灵敏的 p^+ 和 n^+ 层减至最薄，使硅材料中不存在未耗尽部分，一般选用电阻率大的材料和适当高的工作电压，可以使耗尽层扩展到探测器整个厚度。

全耗尽型半导体探测器主要用于粒子种类鉴别和进行能量测量，测量粒子穿过探测器时损失能量 E (dE/dx)。其输出幅度稳定，另外信号上升时间快，一般为十几 ns ，好的可小到 $2ns$ ，也可以用于飞行时间测量和其他要求快测量的地方。

• 位置灵敏探测器

在半导体背面做一层高阻层(10-20 kΩ)，在该层两端加上电压。若A端接地，B端接电荷灵敏放大器，因放大器输入阻抗很低，则B端输出信号幅度反映了入射α粒子如射位置（电荷分配法），称作“位置信号”



B端电流信号

$$I_B = \frac{R_A}{R_A + R_B} I_0$$

电阻正比于长度

$$\frac{R_A}{R_A + R_B} = \frac{L_A}{L_A + L_B} = \frac{x}{L}$$

$$V_B \propto \frac{R_A}{R_A + R_B} E \propto \frac{x}{L} E$$

E 为入射粒子沉积能量

一维位置测量，二维是否可以？

- 电流型探测器

类似电流脉冲电离室情况，电流型半导体探测器用于探测脉冲射线源（即快瞬时、高强度的 γ 、 n 、 x ）的强度和时行行为。所以具有线性响应好、输出电流大、时间响应快等特点，上升时间小于10ns。

- 内放大探测器

类似晶体三极管的放大型和工作在雪崩状态的pn结型，类似气体正比计数器的雪崩二极管发展很快并已获得应用。

雪崩型探测器是一种结型二极管，主要是利用工艺和结构上的办法来达到既使电子倍增，又使噪声增加并不严重的目的。要求探测器有较好的增益均匀性。

§ 5-3 半导体探测器的主要参量

一、窗厚

- 定义：粒子进入探测器灵敏区之前通过的非灵敏区叫窗或死层。窗厚会导致能量损失并使能量分辨变坏。
- 金硅面垒型的窗：金层厚度+硅的死层
一般金层厚**20—100 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$** （质量厚度）
- 扩散型的窗：通常为**0.5-2 μm** ，较厚。
- 离子注入型的窗：与离子束能量有关，可以很薄。对**10 k Ω** 的硅，窗厚可做到**0.04 μm** 。
- 锂漂移型：从锂扩散面入射，窗是厚的，达**0.1-0.3mm**。但做成全耗尽型，从背面金层入射，窗较薄，达**0.1 μm** 。
- 高纯锗：可以象面垒型和离子注入型一样做得较薄。

通常在测量低能例子、核裂片和高精度能量测量中对窗厚要求很高

二、灵敏区厚度

- 灵敏区：是pn结的势垒区、耗尽层或者锂漂移型的补偿区。
- 灵敏区的厚度定义：粒子垂直入射的灵敏区的厚度，记作 W_d 。其确定了能探测的粒子的最大能量。

- 对PN结型：

$$\text{n型Si } W_d = 0.53\sqrt{\rho V_0} (\mu\text{m}) \quad \text{n型Ge } W_d = 1.15\sqrt{\rho V_0} (\mu\text{m})$$

$$\text{p型Si } W_d = 0.32\sqrt{\rho V_0} (\mu\text{m}) \quad \text{p型Ge } W_d = 0.74\sqrt{\rho V_0} (\mu\text{m})$$

- 高纯锗具有很高的电阻率，可以加较高的高压，灵敏区厚度可达几厘米
- 对锂漂移型：灵敏区厚度包括本征补偿层和向两边的外延，由漂移过程决定。一旦做好以后基本为常数。

对平面型为 0.5-10mm

对同轴型为 50-100mm

三、结电容

- 近似情况下，半导体探测器相当于一个填充绝缘介质的平板电容器。

$$C_d = \frac{\epsilon S}{4\pi d} \quad \begin{array}{l} \epsilon \text{ 介电常数, } S \text{ 探测器面积} \\ d \text{ 绝缘介质厚度} \end{array}$$

$$\text{若 } S(\text{cm}^2), d(\text{cm}), \text{ 则 } C_d = \frac{\epsilon S}{9 \times 10^{11} 4\pi d} (\text{F}) = \frac{\epsilon S}{11.3d} (\text{pF})$$

- 锂漂移探测器 d (W_d)与工作电压无关， C_d 接近于常数，一般为十几到几十pF。
- pn结型 d (W_d)与工作电压有关， C_d 一般为几十到几百pF。

N 型Si	$\frac{C_d}{S} = 1.9 \times 10^4 / \sqrt{\rho_N V}$	(pF / cm ²)
P 型Si	$\frac{C_d}{S} = 3.2 \times 10^4 / \sqrt{\rho_P V}$	(pF / cm ²)
N 型Ge	$\frac{C_d}{S} = 1.37 \times 10^4 / \sqrt{\rho_N V}$	(pF / cm ²)
P 型Ge	$\frac{C_d}{S} = 2.12 \times 10^4 / \sqrt{\rho_P V}$	(pF / cm ²)

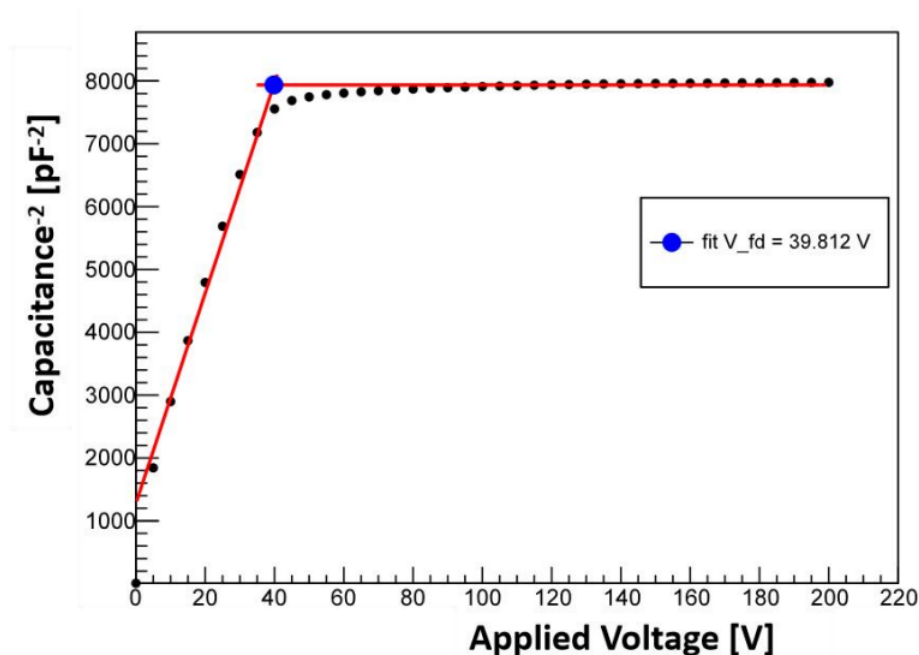
- 同轴型探测器的结电容（圆柱形电容器）：十几至几十pF

$$U = \frac{Q}{C_d}$$

$$C_d = \frac{\epsilon l}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

介电常数 ϵ 本征区高度 l 本征区外径 r_2 本征区内径 r_1

- 探测器输出脉冲幅度与电容有关
- 为了得到小结电容的探测器，应选用电阻率高的材料，使用高的工作偏压和减小探测器面积。
- 结电容随工作电压变化，造成能量相同的入射粒子，在灵敏区产生相同的电子—空穴对，但输出脉冲幅度却可能不同。
- 全耗尽后的情况？



四、正反向电流特性

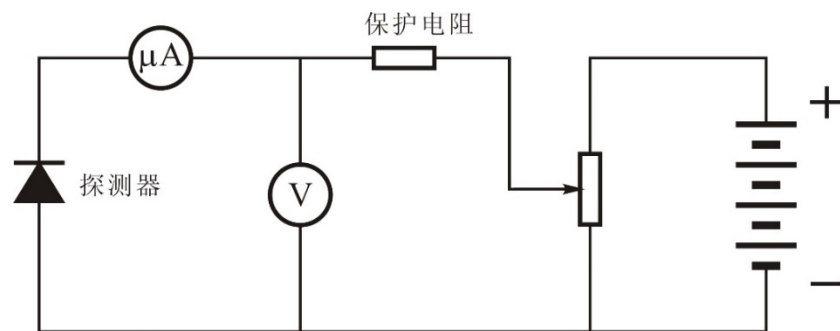
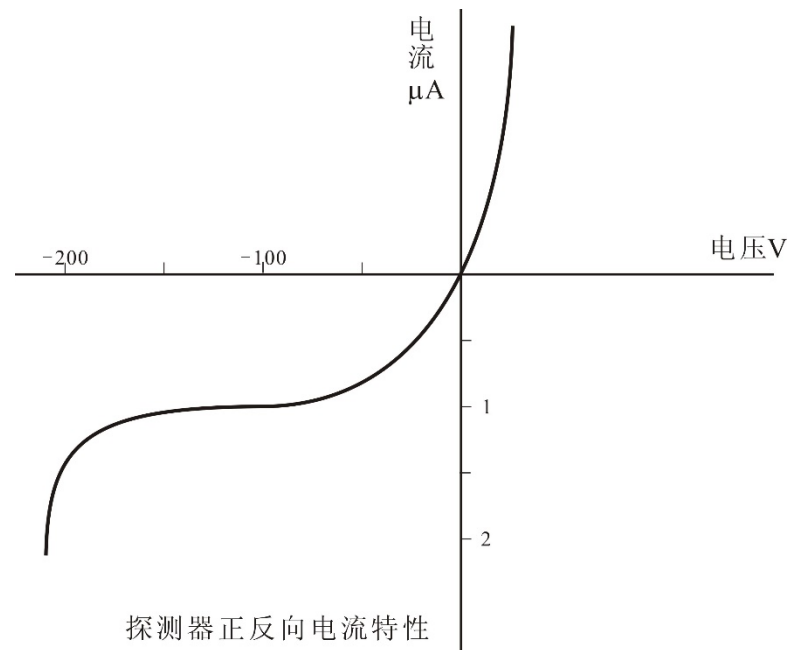
- 要求：二极管伏安特性。

正向电流上升很陡；

反向电流越小越好，因为信号是叠加在反向电流上的。

- 反向电流三个来源：

1) 扩散电流：由灵敏区外少数载流子扩散到灵敏区内产生，一般很小。但若两电极不是欧姆接触，而是形成另外的pn结，将使反向电流大大增加。



测量探测器反向电流装置

2) 体电流: 由灵敏区内复合和俘获中心由于本征热激发产生的载流子在外电场作用下向两极运动, 形成反向体电流。其与灵敏区内本征载流子数目成正比即与本征载流子浓度与灵敏区体积以及温度成正比。

$$I_G = \frac{A \cdot n_i}{2\tau} \cdot W_d \cdot e$$

W_d 为结区宽度, A 为结区面积, τ 为载流子寿命

$$\text{Si} \quad J_G = I_G / A = 1.2 \times 10^{-9} \cdot W_d / \tau \quad (\text{A/cm}^2)$$

$$\text{Ge} \quad J_G = I_G / A = 1.9 \times 10^{-6} \cdot W_d / \tau \quad (\text{A/cm}^2)$$

体电流是反向电流的主要部分, 在低温下工作可以大大减小。

3) 表面漏电流: 沿探测器表面的漏电流, 与制造工艺、表面处理、沾污程度、环境条件等因素有关。会直接影响击穿电压。制造时采用增加表面沟槽或保护环技术, 使用时保证干燥和表面清洁。

五、能量分辨率和线性

- 能量分辨半宽度：主要由电离效应产生的载流子的统计涨落引起

$$\Delta E = E \cdot Re = 2.354\sqrt{F \cdot E \cdot W}$$

材料	Z	介电常数	密度 (g/cm ³)	平均电离功 ε_0 (eV)	
				300K	77K
Si	14	11.7	2.33	3.62	3.76
Ge	22	15.7	5.33	2.80	2.96
CdTe	48, 52			4.46	

- 影响能量分辨率的主要因素：

- 1) 产生电子空穴对的统计涨落；

入射粒子与原子核的散射和核反应的统计涨落，沟道效应等。

- 2) 电子空穴在探测器内的俘获和复合；

由于俘获和复合造成载流子收集不完全影响能量分辨。由于俘获和复合中心分布不均匀造成输出脉冲起伏，与俘获中心的类型、数量和空间分布有关，也与入射粒子种类和能量有关。要求材料的俘获长度远大于灵敏区厚度。

- 3) 探测器和放大器的噪声；

探测器的噪声主要来源于反向漏电流的起伏。降低工作温度可以减小噪声。

- 4) 探测器窗厚、放射源厚度影响等。

窗厚的影响对低能重粒子明显，使用薄窗探测器。

- 能量线性

半导体的平均电离能与入射粒子的能量和种类以及探测器的类型无关，只要所产生的电子空穴对全部被收集，探测器输出脉冲与入射粒子能量成正比。

半导体探测器对各种粒子都有良好的能量线性。

$$V = \frac{Q}{C} = \varepsilon \cdot \frac{E \cdot e}{\varepsilon_0 C} \quad \varepsilon: \text{收集效率}$$

但对低能重粒子，特别是重离子和核裂片，呈现能量非线性。输出脉冲高度U与入射粒子能量E关系：

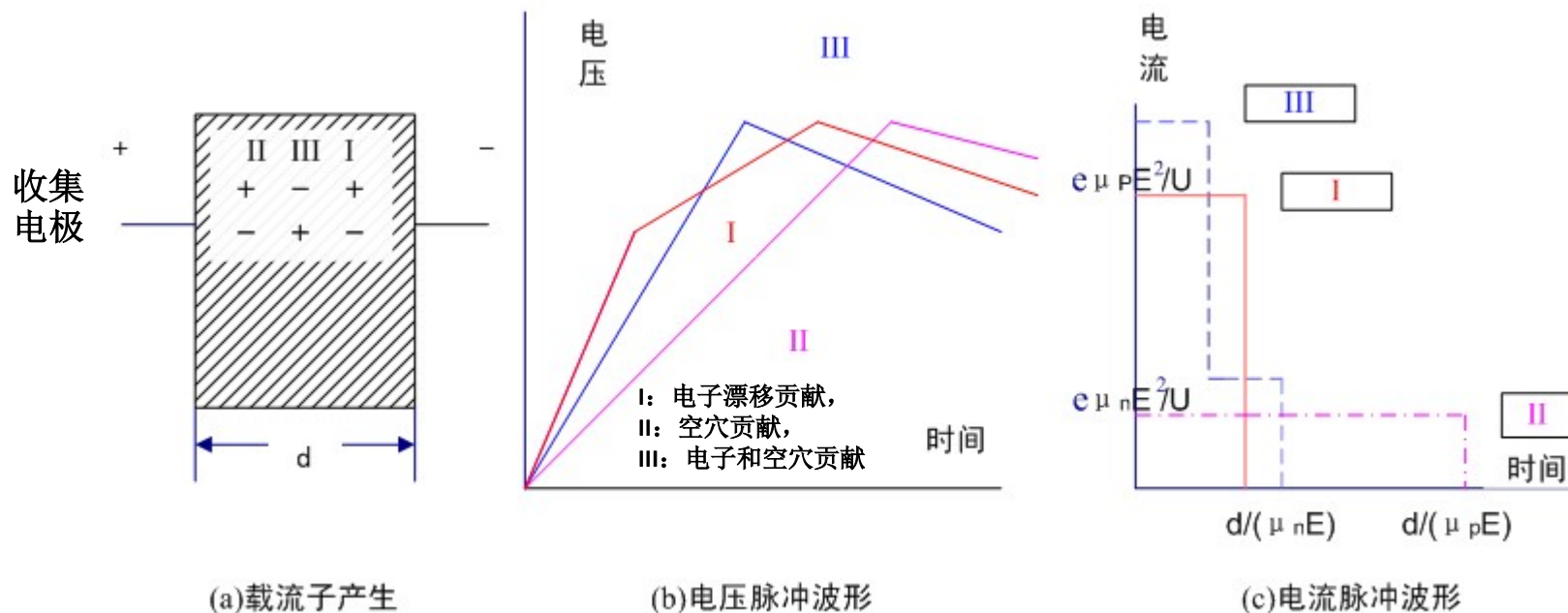
$$E = \alpha U + \delta \quad \alpha: \text{常数}, \delta: \text{脉冲高度亏损}$$

六、脉冲波形和上升时间

- 类似平板固体电离室。在电场作用下，入射粒子产生的电子空穴分别向正负电极运动。设半导体探测器内电场均匀分布，其输出电压脉冲和电流脉冲可以用气体电离室的公式表示：

$$dQ = \frac{qdx}{d}$$

- 由于电子和空穴的漂移速度不同，它们对输出脉冲的贡献不同，输出脉冲形状与产生电离的位置 x_0 有关。



- 三种情况的电压脉冲幅度都是 $U = -\frac{N_0 e}{C_0}$

N_0 是产生电子空穴对数目， C_0 是探测器电容，包括结电容和分布电容

- 实际上入射粒子并不是只在 x_0 处产生电子空穴对，而是沿入射路径电离，因而电压脉冲上升时间最大值 T 由空穴最大漂移时间 T_2 决定。

$$T = T_2 = \frac{d}{w_p} = \frac{d}{\mu_p E} = \frac{d^2}{\mu_p V_0}$$

← 灵敏区厚度
← 工作偏压

上式对全耗尽的锂漂移型适用， T 为几十到几百ns。

- 对pn结型，由于结区电场不均匀，上述推导不成立。金硅面垒探测器的 T 为几到十几ns。

七、辐照效应

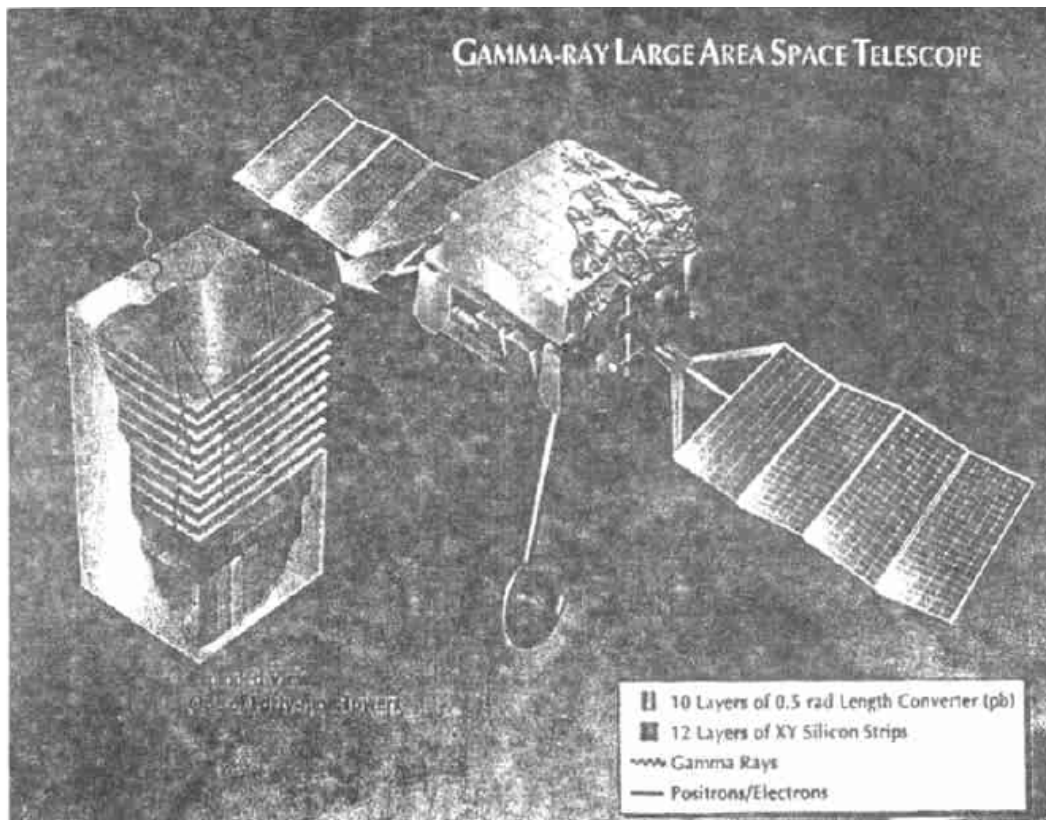
- 辐照在半导体中会造成晶格缺陷，这些缺陷会成为俘获中心，从而降低载流子的寿命，使电阻率发生变化，材料性能发生变化，导致探测器性能变差。
- 辐射损伤与辐射种类、剂量率以及辐照时间和条件有关
- 辐照损伤是半导体探测器的一个致命的弱点。半导体探测器随着使用时间的增加，造成载流子寿命变短，影响载流子的收集。例如，对5.5MeV的 α 粒子，当达到 10^9cm^{-2} 时，分辨率开始变坏，达到 10^{11}cm^{-2} 时明显变坏

§ 5-4 半导体探测器的应用简介

- 随着科技不断发展及需要，在锗锂Ge(Li)、硅锂Si(Li)、高纯锗HPGe、金属面垒型等探测器的基础上研制出许多新型的半导体探测器，如硅微条、硅像素、CCD、硅漂移室等
- 广泛应用在天体物理、工业、安全检测、核医学、X光成像、军事等各个领域。
- 在高能物理方面的应用

大面积 γ 射线太空望远镜GLAST

Gamma-ray Large Area Space Telescope



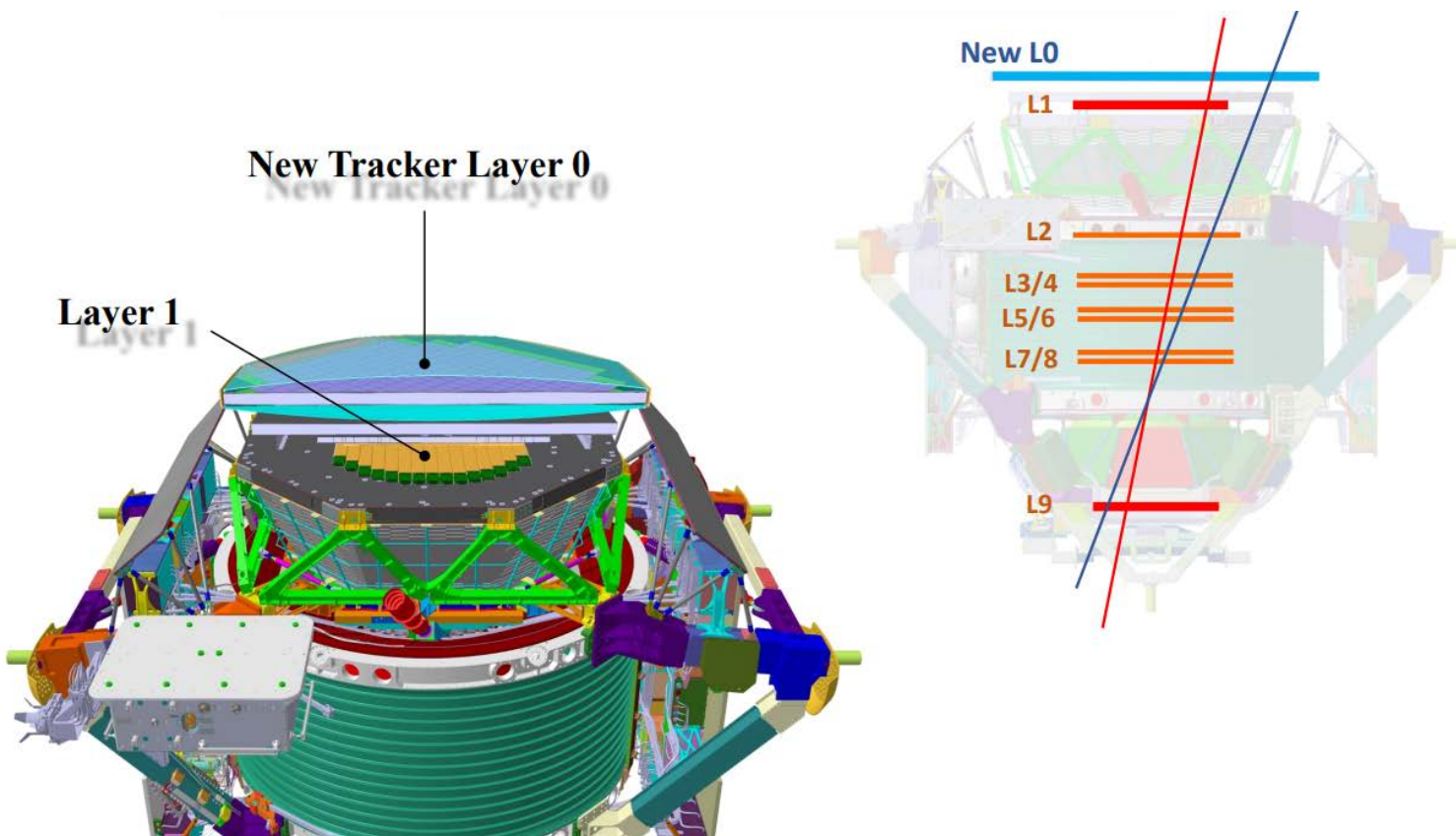
由美国**NASA**和能源部支持及法国、意大利、日本、瑞典等参加的**GLAST** 实验组, 为了研究宇宙中能量在**20—300 GeV** 的 γ 射线等, 研制了**GLAST**, 其核心部分使用了多层硅微条探测器, 总面积大于**80m²**, 共**130** 多万路读出。主要用来作为

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

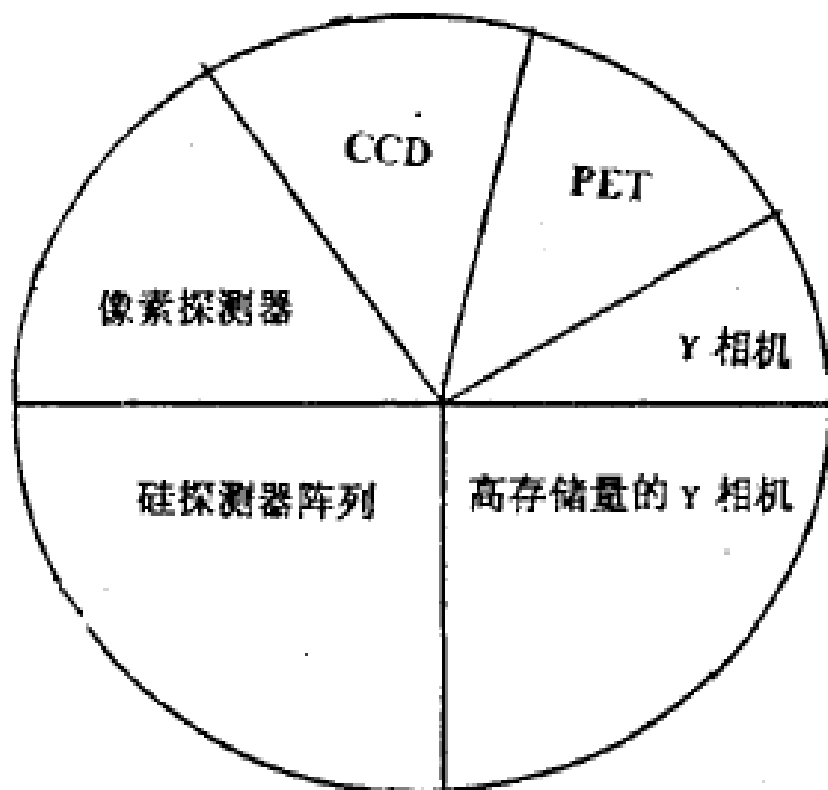
的对转换过程的径迹测量望远镜。

阿尔法磁谱仪 (AMS)

- AMS探测器是唯一在太空长期运行的精密TeV磁谱仪
 - 对通过低质量反物质宇宙线寻找暗物质、寻找宇宙线中的原初反物质等重大基础物理问题的研究具有不可替代性。
 - 硅径迹探测器



在核医学中的应用



1996—1999核医学领域
应用各种探测器的统计概况

- 透射法 (X/γ 穿过人体) :
X光透视、γ-CT等
- 放射法 (短寿命同位素
注入人体) : **PET**
- 要直接从图像中分辨出恶性
细胞和正常细胞的差异, 要
求探测器的空间分辨达到
 μm 量级。目前只有硅微条
探测器、像素探测器、CCD
等半导体探测器才能达到。
硅微条探测器的点位置分辨
 $\sigma=1.25 \mu\text{m}$ 。

小结

- 半导体探测器的种类很多，但大多数是基于加反向偏压的pn结。
- 探测器的灵敏区就是结型探测器的耗尽区，其中载流子浓度极低，电阻率很高，电场强度很大。灵敏区厚度确定了能探测粒子的最大能量。

半导体探测器有突出的优点：

- 1) 非常好的位置分辨率；
- 2) 很高的能量分辨率；
- 3) 很宽的线性范围；
- 4) 非常快的响应时间。

- 因以上优点，半导体探测器在粒子物理与核物理实验中得到广泛应用，在天体物理、宇宙线科学、核医学数字成像技术等领域的应用也迅速发展。