

半导体核探测器载流子有效寿命剖析

宿 昌 厚

(北京工业大学无线电电子学系)

载流子寿命 τ 是半导体材料的重要参数之一,它对器件性能有较大影响。就核辐射探测器来说, τ 决定了反向漏电流,进而在很大程度上影响其噪声的大小。优良探测器要求原始单晶的寿命 τ 为五百到数千微秒。大量实践证明^[1,2],用寿命高而且断面分布均匀的材料制成的探测器,性能优良,成品率和优品率都高。

文献[3—6]阐述了有效寿命 τ_{ef} ,并提出通过测量电荷收集效率 η 可以推算出 τ_{ef} 值,认为有效寿命仅仅取决于俘获效应,只要 τ_{ef} 有几个到十几个微秒,探测器就是好的。

对于原始单晶的寿命 τ 和探测器中的有效寿命 τ_{ef} ,人们往往辨认不清,例如在文献[7]中二者就被混淆,造成了概念上的错误。

本文剖析有效寿命的实质,阐明它与原始单晶载流子寿命在物理概念上的本质区别,并指出导致探测器内电荷损失的原因,不能单纯地用俘获(实为陷阱效应)来解释,还必须考虑复合作用。对于复合中心和陷阱的判据问题也进行了讨论。为了使物理图象清晰,本文用‘陷阱’代替其他文献中的‘俘获中心’。除特别注明者外,本文出现‘俘获’这个词时,均指禁带中某一能级(陷阱与复合中心都在内)捕捉载流子的过程。

一、有效寿命的实质

半导体核辐射探测器中的电荷收集效率 η 可用下式描述^[4]:

$$\eta = \frac{Q_m}{Q_0} = \frac{\tau_{ef}}{t_r} (1 - e^{-\frac{t_r}{\tau_{ef}}}), \quad (1)$$

式中 Q_0 是电离辐射激发出来的总电荷量, Q_m 是能够收集到的最大电荷量, τ_{ef} 为有效寿命, t_r 是载流子渡越宽度为 W 的灵敏区的时间,即

物理

$t_r = W/\mu E$, μ 为载流子迁移率, E 是灵敏区中的电场强度。

通常情况下, $t_r \ll \tau_{ef}$, 故上式可写为

$$\eta = 1 - \frac{1}{2} \frac{t_r}{\tau_{ef}}. \quad (2)$$

由此得出 $\tau_{ef} = \frac{W}{2\mu E(1-\eta)}$. (3)

对于实际灵敏区宽度为 W 的平面型探测器,可以设想存在着一个不损失电荷的表观灵敏区,我们将它称为“无损视在灵敏区”。该区的宽度为 $W_a = \frac{W}{1-\eta}$, (4)

此时 $\tau_{ef} = \frac{W_a}{2\mu E} = t_a$. (5)

显然,所谓有效寿命 τ_{ef} 实质上就是,被射线激发出来的载流子,在一定场强下,渡越无损视在灵敏区一半宽度所需要的时间 t_a 。

无损视在灵敏区(或称表观灵敏区)是为阐明 τ_{ef} 实质而在理论上建立的新概念,其物理模型是:全部被激发的载流子在电场作用下,能够自由飞行的一个空间区域,飞出了这个空间区域,载流子就会被捕获。该区的宽度 W_a 就是全部(无损失)被激发的载流子在电场作用下能够自由飞行而不被捕获的距离。这个距离表征探测器中实际的电荷收集效率 η 。例如, $\eta = 1$ 时,所有被激发载流子能够自由飞行无限远; $\eta = 0.99$ 时,它们只能自由飞行 $100W$; $\eta = 0.95$ 时,只能飞行 $20W$ 的距离。图1是归一化的 W_a 与 η 的关系。实际灵敏区宽度与表观灵敏区宽度之比等于探测器的电荷损失率 ($W/W_a = 1 - \eta$)。

t_a 依赖于场强与温度。在载流子速度与电场关系的未饱和区,场强提高使载流子速度加快, t_a 有所下降。但另一方面,速度的提高使

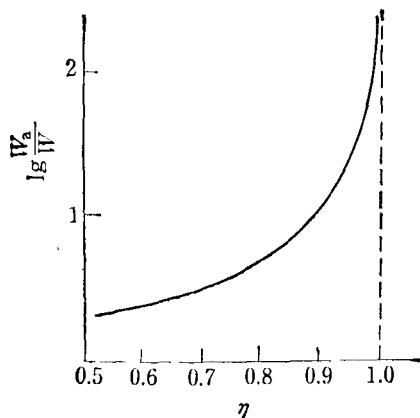


图 1

载流子动能增加, 它们被禁带中空能级捕获的几率减小(例如深能级俘获截面与 $E^{-3/2}$ 成比例), 收集效率提高, 表观灵敏区加宽, t_a 延长。实践证明, 后者的作用一般超过前者。场强提高的结果导致 t_a 增大。温度的降低使迁移率增大, 因而在同样场强下, t_a 缩短。在实际探测器中总有一小部分电荷丢失, $\eta < 1, W_a > W$, 多数情况下 $W_a \gg W$, 但 W_a 不可能达到无限大。在给定场强下, 为了得到一定的电荷收集效率, 载流子的最小平均自由飞行长度应大于或等于 W_a 。用优质锗、硅单晶制成的探测器能够满足这个要求, 以上所述是以平面型器件为例, 但其原则也适用于同轴型探测器。

二、 τ_{ef} 与 τ 的本质区别

原始单晶载流子寿命 τ 是指外界因素在单晶中激发出来的载流子的平均生存时间, 由电子空穴对的净复合率和非平衡载流子数量决定, 其严格定义是非平衡载流子浓度受复合中心作用衰减到初始值的 $1/e$ 所需要的时间。而探测器中的有效寿命 τ_{ef} 是载流子以高速飞越一定距离所经历的时间, 由场强和迁移率决定。为得到 τ 的真实值, 测量时使载流子数量的变化在弱电场或零电场下发生; 而测量 τ_{ef} 时, 载流子的漂移运动是在耗尽区内高电场强度下进行, 并且 τ_{ef} 随场强明显变化^[6]。 τ 与 τ_{ef} 二者在物理概念上有本质的不同, 在测试条件上也有明显差别。所以, 把原始单晶少子寿命 τ 与

器件中的有效寿命 τ_{ef} 加以比较^[4, 8], 没有实际意义。许多实验证明, 不能把二者混淆^[9], 它们之间没有关系^[5]。试图用有效寿命 τ_{ef} 代替 τ 来表征半导体探测器材料性能, 甚至借助有效寿命来否定原始单晶少子寿命的重要性, 都不可取。选用寿命为五百到数千微秒的原始材料, 是为了在探测器中尽可能少丢失一些电荷^[10]。探测器在实际工作时, 灵敏区中场强很高, 一般超过 1kV/cm 。载流子运动速度很快, 特别是在低温下可能接近或达到饱和值 10^7cm/s 。对于不同厚度的探测器进行计算, 得出 t_a 只有几个到十几个微秒, $t_a \ll \tau$, 并且二者相差几十到数百倍, 这是客观必然现象。文献[3]对此作如下解释: 器件制造过程中的热循环, 使原材料中很高的寿命 τ 大大降低到很小的有效值 τ_{ef} 。此种观点不能令人信服。因为第一, 这从根本上混淆了 τ 与 τ_{ef} 的不同性质, 第二, 制造探测器的过程基本上是低温工艺(最高温度不超过 $300\text{--}400^\circ\text{C}$), 并不经历足以使寿命大幅度下降的高温处理过程。实验早已证实, 制造面垒型和锂漂移型探测器工艺中的温度并不导致载流子寿命的明显变化。

三、陷阱与复合中心

迄今许多文献过多强调用‘俘获’(实为陷阱效应)解释电荷损失和有效寿命, 甚至认为在耗尽区中载流子通过局部能级的复合过程很少发生^[3]。这种看法不全面, 因为没有提出充分依据证明发生陷阱效应的几率远大于复合过程。相反, 一般情况下陷阱和复合都应当考虑。特别是在探测重带电粒子时, 沿径迹产生的云雾状载流子形成高电导等离子体, 电子和空穴复合几率相当大, 并随着产生的载流子数目的增加而增大^[11]。

若原始单晶中没有陷阱, 器件制造中也不引进陷阱(从电子有效寿命与温度的关系中未发现禁带中存在陷阱^[4]), 这时 τ_{ef} 似应很高。但是按收集效率求出的 τ_{ef} 仍然远低于 τ 。可见把具有很小的 τ_{ef} 值归因于陷阱的存在, 显然是不恰当的。Mayer^[9] 曾指出, 在忽略陷阱效应

对于能量分辨率的影响的情况下,载流子平均自由漂移时间为 $100W/\mu E$. 这相当于 $\eta = 0.995$, $W_n = 200W$. 令 $W = 0.3\text{cm}$, 则 $t_n = 3\mu\text{s}$. 不言而喻,此时电荷损失是由复合造成.

应该指出,在实际半导体材料中总是存在外来杂质和晶格缺陷,它们形成的能级所起的作用基本上分为两大类:复合中心和陷阱中心.二者对载流子的运输都会产生影响.复合中心可以自由地与导带和价带交换电子与空穴.它们依次捕获两种不同类型的载流子,继而使其复合,净复合率为

$$R_n = \frac{S_{rn}S_{rp}\nu N_r}{S_{rn}(n+n_1) + S_{rp}(p+p_1) \cdot (np - n_1^2)}, \quad (6)$$

复合中心对电子的俘获截面和对空穴的俘获截面相等,即 $S_{rn} \approx S_{rp}$. 陷阱中心只能自由地与导带交换电子(电子陷阱),或者自由地与价带交换空穴(空穴陷阱).它们收容非平衡的载流子,过一段时间再把这些载流子释放出来.陷阱的特点是 $S_{rn} \gg S_{rp}$, 或 $S_{rp} \gg S_{rn}$. 电子落入陷阱以后基本上不能直接与空穴复合,必须首先受激回到导带,然后再通过复合中心与空穴复合.陷阱对电子的俘获率为^[12]

$$C_n = S_{rn}\nu n(N_t - n_t), \quad (7)$$

这里 ν 是热运动速度, n, p 为导带电子和价带空穴密度, N_t 是陷阱密度, n_t 是占据陷阱的电子密度, n_1, p_1 是费米能级与复合中心能级重合时导带电子与价带空穴密度, $n_1^2 = n_1 p_1$. 可见 C_n 和 R_n 与晶体纯度和结构完整性密切相关.当载流子在陷阱中的停留时间与电子学系统的脉冲成形时间常数是同一量级或前者大于后者时,电荷收集效率将大为降低.反之,陷阱对收集效率的影响就比较弱.

由于陷阱和复合中心可能同时存在,一般来说电荷损失 $(1 - \eta)$ 要受二者共同作用.只强调‘俘获’(实为陷阱),不顾及复合,是不严格的. n 型硅中价带顶以上 0.72eV 和 0.45eV 处的陷阱对空穴的俘获截面是 $(4-8) \times 10^{-18}\text{cm}^2$ ^[13], 而重金属杂质复合中心的俘获截面大于 10^{-17}cm^2 , 可见复合效应有时占优势.

为区分陷阱和复合中心,可在禁带中引入分界能级.如果位于导带底以下 E_t 处的某能级上的电子受激回到导带中去的几率,大于它与来自价带的自由空穴的复合几率,即 $S_{rn}\nu n_1 n_t > S_{rp}\nu p n_t$, 则此能级是电子陷阱能级电子分界能级 E_{dn} 由下式决定^[14]:

$$E_{dn} = E_{Fn}^* + kT \ln \left(\frac{n S_{rn}}{p S_{rp}} \right), \quad (8)$$

(8) 式的能量坐标是从导带底 E_c 往下算起.空穴的分界能级 E_{dp} 可写成

$$E_{dp} = E_{Fp}^* - kT \ln \left(\frac{n S_{rn}}{p S_{rp}} \right), \quad (9)$$

其能量坐标从价带顶 E_v 往上算起.分界能级位置决定于 S_{rn}, S_{rp} 和 n, p . (8) 式和 (9) 式中的 E_{Fn}^* 与 E_{Fp}^* 为准费米能级.

按分界能级理论,禁带被划分成五个区域(图2): 1和5区分别为电子和空穴的陷阱区, 2和4是过渡区, 3是电子与空穴的复合区. 1区与导带保持热平衡,这里的能级基本上是空的.位于 E_{Fn}^* 附近的能级具有最强的陷阱作用.随着 E_t 的升高,电子被激发回导带的几率迅速增大. 2区与导带处在不稳定的平衡状态,该区中的能级在 E_{Fn}^* 以下,在很大程度上已充满电子,它们具有成为复合中心的趋势.对空穴陷阱区5和过渡区4也可做类似分析.

晶格缺陷和杂质能级究竟是陷阱还是复合中心,主要取决于它们在禁带中的位置.金属杂质、位错和空位等在禁带中形成的施主和受主能级,都可能成为陷阱或复合中心,或二者兼有之.一些深能级杂质例如 $\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Au}$,

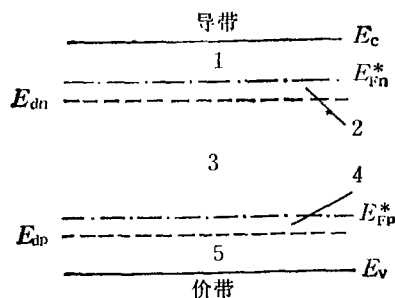


图2 禁带中的分界能级

Mn 等,在锗和硅中构成多重能级,它们主要起复合中心的作用,俘获截面约在 10^{-13} — 10^{-17} cm²范围内^[15,16]。氧在硅中 $E_c - 0.38$ eV 处的受主能级是电子陷阱,而在 $E_v + 0.35$ eV 处的能级是复合中心。在 Ge(Li) 探测器中, Li 与缺陷相互作用形成较好的电子陷阱,俘获截面为 $(2-5) \times 10^{-13}$ cm²。低温下,铜在锗中形成空穴陷阱。在陷阱和复合中心分布不均匀的探测器中,输出脉冲幅度视产生载流子的地点而异,外来杂质和晶格缺陷的多少及其分布均匀与否,是影响探测器能谱特性的重要因素之一。

要判断电荷损失的主要原因是陷阱效应还是复合作用,原则上可从两方面考虑:

(1) 考查探测器能谱曲线的形状。如果能谱不对称,低能区谱线发生严重畸变(特别是反压较低时),并有比较明显的非高斯分布的拖尾,则陷阱效应(包括辐射损伤造成的陷阱)占主导地位。因为射线的低能成分把陷阱收容的电子(以电子陷阱为例)释放回导带,使其参与信号形成过程。换言之,陷阱中的载流子受激回到相应能带,随后又被收集,这是引起低能区谱线不对称的重要原因之一。有时候电极制备不良或测试系统放大器调整不当,也能使谱线发生某些变化,实验中应力求避免。

(2) 观察用光电导法测量原始单晶寿命时的衰减曲线。如果曲线后部偏离指数规律,具有较长的拖尾,则说明材料中存在大量陷阱。特别是在 P 型硅中,载流子的多次陷落现象更易形成长尾巴^[13]。探测器能谱形状的畸变和原始单晶光电导衰减曲线的长拖尾,说明陷阱中心位于 1 区的准费米能级 E_{Fn}^* 附近。

若能谱曲线对称,低能区没有明显失真,同时原材料光电导衰减曲线较好地服从指数规律,没有拖尾,则复合作用是造成电荷损失的主要原因。载流子飞越实际灵敏区所需的时间 t_f 很短,但就在这短暂时间内,陷阱和复合中心以一定几率收容和捕获其中一部分载流子,致使载流子在输运过程中,在到达电极之前,数量就有所减少,导致收集效率 $\eta < 1$ 。

综上所述,我们得到以下几点认识:

(1) 欲提高电荷收集效率,重要的是继续改进半导体单晶的纯度和晶格完整性,进一步延长载流子寿命 τ , 并完善器件工艺。这要比研究器件中的有效寿命 τ_{ef} 意义更大。特别是对于在低温下工作的探测器,原始单晶的性质更显得重要,因为杂质能级和缺陷中心的俘获截面随温度下降而增大。

(2) 除了载流子统计涨落和探测器及电子系统的噪声以外,在影响能量分辨率的诸因素中,陷阱效应和复合作用二者都应考虑。在有些情况下,某一因素更为突出也是可能的。

(3) 在禁带中引入分界能级,为区别陷阱和复合中心提供了理论依据。把探测器的谱线形状和原始单晶的光电导衰减特性结合起来分析,是研究材料与器件关系的一个可能的实际手段。

4. 用‘平均自由飞行时间’代替‘有效寿命’这个词,物理意义更为确切。

参 考 文 献

- [1] 孙雪瑜,稀有金属, No. 6 (1981), 39.
- [2] 宿昌厚、姜玉香,稀有金属, No. 6 (1983), 31.
- [3] G. Bertolini, A. Coche, Semiconductor Detectors, North-Holland Publishing Company Amsterdam, (1968), 24.
- [4] J. A. Coleman, L. J. Swartzendraber IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-13-3 (1966), 240.
- [5] R. Henck, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-17-3 (1970), 149.
- [6] A. H. Gher, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-18-1 (1971), 175.
- [7] 徐克尊,粒子探测技术,上海科技出版社,(1981), 95.
- [8] 尤乃谈,核仪器与方法, 3-3(1983), 38.
- [9] J. W. Mayer, Semiconductor Detectors, North-Holland Publishing Company Amsterdam, (1968), 455.
- [10] J. T. Waltom and E. E. Haller, LBL-14909, (1982), 7.
- [11] Sander Deme, Semiconductor Detectors for Nuclear Radiation Measurement, (1971), 98.
- [12] 刘文明,半导体物理学,吉林人民出版社,(1982), 273.
- [13] 黄昆、谢希德,半导体物理学,科学出版社,(1958), 245.
- [14] В. В. Сердюк, Г. Г. Гемересюк, Фотоэлектрический Процесс в Полупроводниках, (1982).
- [15] 黄昆、韩汝琦,半导体物理基础,科学出版社,(1979), 99.
- [16] 刘恩科、朱秉升,半导体物理学,国防工业出版社,(1979), 138.