

判别两个或两个以上深能级是否属于同一中心的方法*

陈开茅 金泗轩 武蓝青 谭雪清

北京大学物理系

1988年10月24日收到

本文分别研究了两个或两个以上深能级之间的耦合和非耦合两种情况所对应的光电容瞬态,根据这两种瞬态的本质差别,提出一个判别两个或两个以上深能级是否属于同一深中心的方法。它具有适用于两个以上的多个深能级的样品以及方法简单和测量时间短等优点。作为例子,将它应用于判别硅中和金有关的施主和受主两能级,结果证实它们确实是属于和金有关的同一中心,而不是分属于两个中心。

一、引言

在半导体中往往存在和某种杂质有关的两个或两个以上深能级。由于杂质可以以不同形态存在于半导体中,例如有间隙原子、代位原子以及杂质与其它杂质或杂质与晶格点缺陷的络合物等可能的形态,因此判断多个深能级是否属于和某种杂质有关的同一深中心的问题是比较难于解决的,它是半导体深能级杂质缺陷研究的重要内容之一。由于在过去很长的一段时间里,没有人提出研究这一问题的比较可靠的测量方法,结果对于一些重要深能级的看法存在着矛盾,例如对硅中金的施主能级和受主能级的看法就是如此^[1]。1982年 Ledebor 和王占国^[2]提出利用光电容技术观测光激跃迁过程中两个深能级属于同一中心时束缚载流子浓度变化的方法,并用这一方法证明了硅中和金有关的施主能级和受主能级属于同一中心,成功地解决了这个有争议的问题。他们的工作是很有意义的。但这一测量方法如作为普适的判别几个深能级是否属于同一中心的方法,还存在如下不足之处:被测量的两个能级之间不能存在第三个能级;测量步骤较繁、测量时间很长,这样就会使测量仪器的零点漂移,放大倍数的不稳定以及杂散光和长波辐射等影响测量结果的准确性。本文详细研究了深能级三态动力学过程所产生的光电容瞬态,提出了一个较为简单可靠的研究这种问题的测量方法,同样以硅中金施主能级和受主能级为例作了测量研究。结果同样表明这两个能级确实属于和金有关的同一中心。

二、原理

为了不使分析过于复杂,这里仅假设在半导体禁带中存在着和某种杂质有关的一个

* 国家自然科学基金资助的课题。

深施主 E_d 和一个深受主 E_a , 前者在禁带的下半部, 后者在禁带的上半部, 见图 1(a) 和 2(a). 如果这两个深能级的深度足够深, 则在液氮温度附近它们的载流子热发射率和光电离率相比小得多, 在讨论空间电荷区中各种能级的束缚载流子浓度随光激发过程的变化时, 可以把前者忽略不计. 下面以反向偏置的 $n^+ - p$ 结为例分别讨论两个深能级的非耦合和耦合两种情况.

1. 非耦合情况

非耦合情况是指两个深能级分别属于不同中心, 不同中心的电荷态之间互不相干. 在

空间电荷区中和在单色光的激发下, 各深中心的电荷态之间的转化如图 1 所示. 图 1(a) 表示束缚载流子的光跃迁过程, 图 1(b) 表示每个深中心各自电荷态的相互转化. 图 1 中 n_{dt}^+ 和 n_{dt}^0 分别表示施主中心被空穴和电子占据的浓度, 前者是正电荷态的浓度, 后者是电中性态的浓度. e_{dp}^+ 和 e_{dn}^0 分别表示施主能级上的空穴被光电离到价带和电子被光激发到导带的几率, 符号右上角的“+”和“0”分别表示跃迁过程发生之前深中心的电荷态. 类似地, n_{at}^0 和 n_{at}^- 分别表示处于中性态和负电荷态的受主中心浓度, e_{ap}^0 和 e_{an}^- 分别表示受主能级的空穴和电子的光电离率. 在光照之前, 先将 $n^+ - p$ 结由反向偏置变为零偏置, 使得原来空间电荷区中的深能级为空穴饱和填充. 接着使 $n^+ - p$ 结回到反向偏置, 此时在光激发过程中两个深能级的束缚载流子浓度的微分方程及初始条件分别为

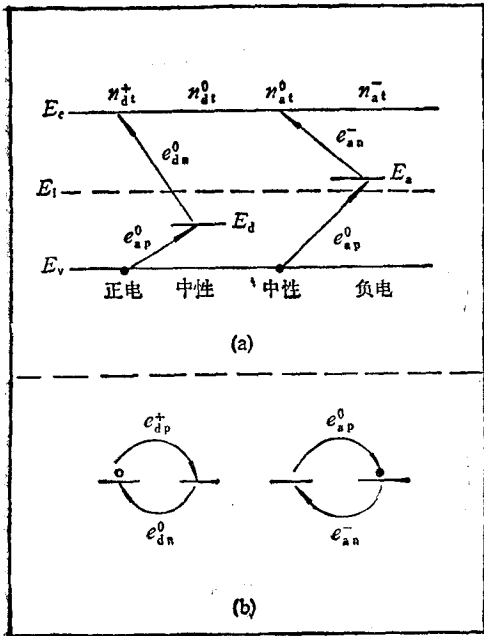


图 1 在空间电荷区中相互独立的施主和受主能级的载流子光跃迁 (a) 跃迁过程; (b) 施主中心和受主中心各自电荷态之间的相互转化

$$\frac{dn_{dt}^+}{dt} = -(e_{dp}^+ + e_{dn}^0)n_{dt}^+ + e_{dn}^0 N_{dt}, \tag{1}$$

$$n_{dt}^+(0) = N_{dt}; \tag{2}$$

$$\frac{dn_{at}^0}{dt} = -(e_{ap}^0 + e_{an}^-)n_{at}^0 + e_{an}^- N_{at}, \tag{3}$$

$$n_{at}^0(0) = N_{at}, \tag{4}$$

式中 $N_{dt} = n_{dt}^+ + n_{dt}^0$ 和 $N_{at} = n_{at}^0 + n_{at}^-$ 分别为深施主和深受主浓度. 解微分方程 (1) 和 (3) 并使之分别满足初条件 (2) 和 (4) 式, 得到深施主正电态和深受主中性态的浓度随时间的变化分别为

$$n_{dt}^+(t) = N_{dt}(1 - e_{dn}^0 \tau_d) \exp(-t/\tau_d) + e_{dn}^0 \tau_d N_{dt} \tag{5}$$

和

$$n_{it}^0(t) = N_{it}(1 - e_{in}^- \tau_a) \exp(-t/\tau_a) + e_{in}^- \tau_a N_{it}, \quad (6)$$

式中

$$\tau_d^{-1} = e_{dp}^+ + e_{dn}^0, \quad \tau_a^{-1} = e_{ap}^0 + e_{an}^-. \quad (7)$$

它们分别表示施主中心和受主中心的光电离时间常数。

2. 耦合情况

所谓耦合情况是指两个或两个以上深能级属于同一中心, 这种中心具有三个或三个以上的电荷态, 这些电荷态之间是彼此关联着的, 在一定条件下, 各电荷态可以相互转化。图 2 示出具有施主和受主两个能级的深中心。其中 n_i^+ , n_i^0 和 n_i^- 依次表示深中心处于正电态、中性态和负电态的浓度。在单色光的激发下, 深中心向价带发射空穴时, 由正电态转化为中性态, 再发射空穴, 中性态变为负电态。向导带发射电子, 深中心可由负电态变成中性态, 再发射电子, 中性态变成正电态。任何时候, 这三种电荷态的浓度之和都等于深中心浓度 N_{it} , 即

$$n_i^+ + n_i^0 + n_i^- = N_{it}. \quad (8)$$

在光照之前同样将 n^+p 结由反向偏置变为零偏置, 使其中的深中心填满空穴, 以此作为光激发过程的初始条件。当 n^+p 结恢复为反向偏置后立刻加光照, 在光激发下, 深能级束缚载流子, 即深中心各电荷态浓度的微分方程为

$$\frac{dn_i^+}{dt} = -e_{dp}^+ n_i^+ + e_{dn}^0 n_i^0, \quad (9)$$

$$\frac{dn_i^-}{dt} = -e_{an}^- n_i^- + e_{ap}^0 n_i^0, \quad (10)$$

以及初条件为

$$n_i^+(0) = N_{it}, \quad n_i^0(0) = n_i^-(0) = 0. \quad (11)$$

解微分方程(9),(10)并使之满足条件(11)式, 得到光激发下深中心各电荷态浓度随时间 t 的变化为

$$n_i^-(t) = A e_{ap}^0 N_{it} \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \exp(\alpha_1 t) + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(\alpha_2 t) + 1 \right], \quad (12)$$

$$n_i^0(t) = A N_{it} \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 + e_{in}^-) \exp(\alpha_1 t) + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} (\alpha_2 + e_{in}^-) \exp(\alpha_2 t) + e_{in}^- \right], \quad (13)$$

$$n_i^+(t) = N_{it} \left\{ 1 - A \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 + \tau_a^{-1}) \exp(\alpha_1 t) \right. \right.$$

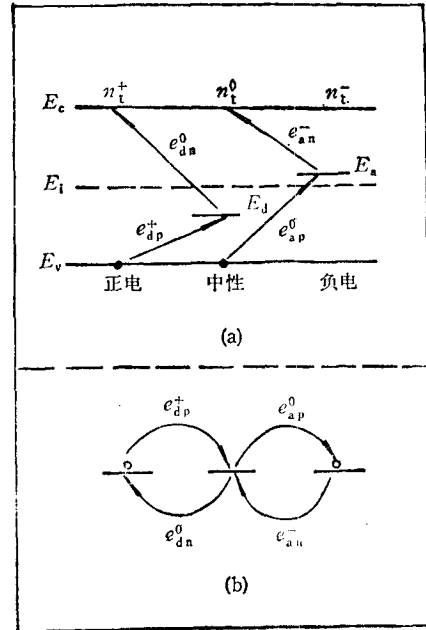


图 2 在空间电荷区中耦合能级束缚载流子的光跃迁过程 (a) 能带图示意; (b) 电荷态的相互转化

$$+ \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} (\alpha_2 + \tau_a^{-1}) \exp(\alpha_2 t) + \tau_a^{-1} \Big\}, \quad (14)$$

式中

$$A = e_{dp}^+ / \left(\frac{e_{an}^-}{\tau_d} + e_{sp}^0 e_{dp}^+ \right), \quad (15)$$

$$\alpha_i = -(\tau_d^{-1} + \tau_a^{-1})/2 \pm \{ [(\tau_d^{-1} - \tau_a^{-1})/2]^2 + e_{sp}^0 e_{da}^0 \}^{1/2}, \quad (16)$$

式中当 $i = 1$ 时, 在根式前取+号, 当 $i = 2$ 时, 取-号. 如果把单色光的光子能量 $h\nu$ 限制在 $E_d - E_v < h\nu < E_c - E_d$ 范围内, 其中 E_c 和 E_v 分别表示半导体的导带底和价带顶, 则不可能出现光把 E_d 能级上的电子激发到导带的现象, 即 $e_{da}^0 = 0$. 由(16)式可知, 此时 $\alpha_1 = -\tau_a^{-1}$, $\alpha_2 = -\tau_d^{-1}$, 以及由(14)式可知, 此时深中心的正电态浓度 $n_i^+(t)$ 可以简化为单指数时间函数, 即

$$n_i^+(t) = N_{ii} \exp(-t/\tau_d), \quad (17)$$

而深中心的中性态和负电态的浓度仍然都是双指数时间函数.

将方程(5),(6)与(12),(13)和(14)作一比较, 可以看出在非耦合情况下, 深中心的各电荷态浓度随着光激发作单指数时间函数变化, 而在耦合情况下, 深中心各电荷态浓度在光照下作双指数时间函数变化, 且两个时间常数 $-\alpha_1^{-1}$ 和 $-\alpha_2^{-1}$ 与非耦合时的 τ_a 和 τ_d 不相同. 只有在光子能量为 $E_d - E_v < h\nu < E_c - E_d$ 时, 其中的 $n_i^+(t)$ 才可以简化为(17)式所示的单指数时间函数, 而且此时的时间常数 $-\alpha_1^{-1}$ 和 $-\alpha_2^{-1}$ 才与非耦合时的 τ_a 和 τ_d 分别相同.

在空间电荷区的边区中, 由于深能级对带中载流子的俘获率大于或远远大于深能级束缚载流子的光发射率, 因此深能级的载流子不能因光激发而耗尽. 这个边区的宽度的大小取决于浅杂质浓度 N_s , 束缚载流子的光电离截面、光的波长和强度等. 在后面的讨论中, 我们定义反向偏压 V_r 对应的空间电荷区宽度 (X_r) 减去边区宽度所得到的差为深能级束缚载流子的光激发有效宽度. 在这一宽度内, 深能级束缚载流子可以因光电离而耗尽. 宽度的大小和深能级的光学性质、光的强度以及浅杂质浓度等有关. 记这一宽度为 X_{ir}^0 , 其中下角标 i 和 r 分别表示第 i 个深能级和反向偏压 V_r , 上角标“0”表示光. 同时为了讨论方便, 假设 $N_{di} = N_{ai} = N_{ii}$.

关于空间电荷区中深能级束缚载流子的发射过程所产生的电容瞬态, 文献[3,4]已经对它作了详细论述, 不过在那里讨论的是热激发过程. 现在把它引用过来, 在浅杂质浓度 $N_s \gg N_{ii}$ 条件下, 将上面讨论的非耦合时的光激发过程束缚载流子方程(5),(6)以及耦合时的(12),(13)和(14)式先后代入文献[4]的(6)式中, 其结果如下.

两个深能级非耦合的光电容瞬态 $\Delta C_{i+d}^0(t)$ 为

$$\begin{aligned} A_i^0 N_{ii}^-(X_r) \Delta C_{i+d}^0(t) / C_i^0 = & - \left[\int_{X_{d0}}^{X_{dr}^0} N_{di}(x) x dx \right] \exp(-t/\tau_d) \\ & - \left[\int_{X_{a0}}^{X_{ar}^0} e_{sp}^0 \tau_a N_{ai}(x) x dx \right] \exp(-t/\tau_a), \end{aligned} \quad (18)$$

式中 C_i 为反向偏压 V_r 时 n^+ - p 结电容, $N_{ii}^-(X_r)$ 为反向偏压 V_r 时空间电荷区边界处的浅受主浓度, X_{d0} 和 X_{a0} 分别为零偏压时空间电荷区中深施主能级和深受主能级与费密能级的交点位置, X_{dr}^0 和 X_{ar}^0 分别为反向偏压 V_r 时深施主和深受主能级的光激发有

效宽度, x 是以结为原点指向体内的描述空间电荷区任一位置的坐标, A 为结面积, ϵ_s 为半导体的介电常数。为了便于后面的分析, 把 (18) 式改写成简单形式, 即

$$\Delta C_{i+d}^n(t) = \Delta C_d^n(t) + \Delta C_i^n(t), \quad (19)$$

$$\Delta C_d^n(t) = \Delta C_d^n(0) \exp(-t/\tau_d), \quad (20)$$

$$\Delta C_i^n(t) = \Delta C_i^n(0) \exp(-t/\tau_a), \quad (21)$$

式中

$$\Delta C_d^n(0) = -\frac{C_r^3}{A^2 \epsilon_s^2 N_s^-(X_r)} \int_{x_{d0}}^{x_{d1}^0} N_{d1}(x) x dx, \quad (22)$$

$$\Delta C_i^n(0) = -\frac{C_r^3 e_{sp}^0 \tau_a}{A^2 \epsilon_s^2 N_s^-(X_r)} \int_{x_{a0}}^{x_{a1}^0} N_{a1}(x) x dx. \quad (23)$$

(19) 式中的 $\Delta C_d^n(t)$ 和 $\Delta C_i^n(t)$ 分别表示在非耦合下深施主和深受主两能级完全被空穴占据后, 光激发空穴造成的光电容瞬态。由此可见, 在两个深能级不属于同一中心时, 它们的束缚载流子光跃迁所产生的电容瞬态等于两个能级单独存在时候产生的电容瞬态之和, 每个分量都是单一指数的时间函数。

两个深能级耦合时的光电容瞬态 $\Delta C_{i+d}^c(t)$ 为

$$\Delta C_{i+d}^c(t) = \Delta C_d^c(t) + \Delta C_i^c(t), \quad (24)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta C_d^c(t) = \Delta C_d^n(0) \left\{ 1 - A \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 + \tau_a^{-1}) \exp(\alpha_1 t) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} (\alpha_2 + \tau_a^{-1}) \exp(\alpha_2 t) + \tau_a^{-1} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Delta C_i^c(t) = \Delta C_i^n(0) (A/\tau_a) \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \exp(\alpha_1 t) \right. \\ \left. + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(\alpha_2 t) \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

将非耦合和耦合的电容瞬态作一比较, 可以看出它们是两种性质完全不同的电容瞬态, 前者两个能级的光电容瞬态分量是独立无关的, 后者两个能级的光电容分量是密切相关的。根据这种本质差别就可以正确地区分两个深能级是否属于同一中心。

3. 判别两个或两个以上深能级是否属于同一中心的方法

在液氮温度附近, 先将 $n^+ - p$ 结或肖特基势垒处于零偏置, 当样品恢复为反向偏置时用光子能量为 $E_d - E_v < h\nu < E_a - E_v$ 的单色光照射样品, 把 E_d 能级上的空穴电离掉, 而 E_a 能级上的空穴原封不动。当 E_d 能级在光激发下达到稳定的占据状态之后, 再用光子能量为 $E_a - E_v < h\nu < E_c - E_d$ 的单色光照射样品, E_a 能级的空穴被光也电离掉。伴随这两种光照, 样品结电容先后出现两次变化, 准确记录下后一次变化 $\Delta C_{i+d}^n(t, h\nu)$ 。接着让样品再次变为零偏, 使 E_d 和 E_a 都填满空穴。当样品恢复为反向偏置后, 用和刚才激发 E_a 能级相同的光照射样品, 这时两个能级的空穴都将被光电离掉, 相应的光电容瞬态 $\Delta C_{i+d}(t, h\nu)$ 是两个能级的空穴光跃迁引起的。如果两个深能级不是属于同一中心, 而是分别属于两个不同的中心, 则 $\Delta C_{i+d}(t, h\nu)$ 是 $\Delta C_{i+d}^n(t, h\nu)$, 由它减去

单独 E_a 引起的瞬态 $\Delta C_a^i(t, h\nu)$ 应该等于单独 E_a 能级引起的瞬态 $\Delta C_a^i(t, h\nu)$, 即

$$\Delta C_{a+d}^i(t, h\nu) - \Delta C_d^i(t, h\nu) = \Delta C_a^i(t, h\nu) = \Delta C_a^i(0, h\nu) \exp[-t/\tau_a(h\nu)]. \quad (27)$$

由此可见, 它是单一指数时间函数. 如果不是这样, 而是两个能级属于同一中心, 则 $\Delta C_{a+d}(t, h\nu)$ 为 $\Delta C_{a+d}^c(t, h\nu)$, 由它减去单独 E_a 引起的 $\Delta C_a^i(t, h\nu)$ 不等于单独 E_d 能级引起的 $\Delta C_d^i(t, h\nu)$, 而是

$$\begin{aligned} \Delta C_{a+d}^c(t, h\nu) - \Delta C_a^i(t, h\nu) = & \left[\Delta C_d^i(0, h\nu) - \frac{\tau_d(h\nu)}{\tau_a(h\nu) - \tau_d(h\nu)} \Delta C_a^i(0, h\nu) \right] \\ & \cdot \exp[-t/\tau_d(h\nu)] \\ & + \frac{\tau_d(h\nu)}{\tau_a(h\nu) - \tau_d(h\nu)} \Delta C_a^i(0, h\nu) \exp[-t/\tau_a(h\nu)]. \quad (28) \end{aligned}$$

它是个双指数时间函数. 在得到上式的过程中, 利用了 $h\nu < E_c - E_d$, $e_{dn}^0 = 0$ 这个条件.

应该指出, 虽然以上论述集中于两个深能级的情况, 但是讨论问题的方法和结果完全

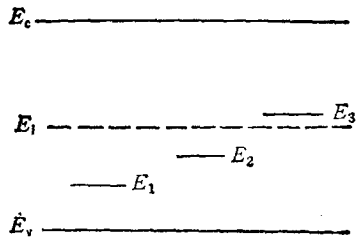


图3 在半导体的禁带中三个深能级示意

可以推广到两个以上的多深能级系统中去. 例如在半导体的禁带中有三个深能级, 见图3, 按它们离开价带的距离依次命名为 E_1, E_2 和 E_3 , 而且 $E_c - E_2 > E_3 - E_v$. 可以推断这三个能级与深中心可能有五种对应关系: 三个能级分别属于三个不同的中心; 三个能级属于同一中心; E_3 单独属于一个中心, E_1 和 E_2 同属于另一中心; E_2 单独属于一个中心, E_1 和 E_3 同属于另一中心; E_1 单独属于一个中心, E_2 和 E_3 同属于另一中心等.

通过选取适当的光波长, 用上述研究两个深能级的理论和方法研究三个能级中的所有两个能级之间的关系, 就可以搞清三个深能级与深中心的对应关系. 具体作法如在研究 E_2 和 E_3 的关系时, 可先将 n^+-p 结或肖特基势垒变为零偏置, 使各深能级都填满空穴, 在样品恢复为反向偏置后, 用 $E_2 - E_v < h\nu < E_3 - E_v$ 的光照射样品, 使 E_1 和 E_2 两个能级的空穴被光电离掉, 当结电容达到稳定后, 用 $E_3 - E_v < h\nu < E_c - E_2$ 的单色光照射样品, 记下这时由 E_3 空穴光跃迁引起的电容瞬态 $\Delta C_3(t, h\nu)$. 将样品再次变为零偏置使所有深能级填满空穴. 当偏压回到反向偏置后, 用 $E_1 - E_v < h\nu < E_2 - E_v$ 的光把 E_1 的空穴电离掉. 当结电容达到稳定后, 用和刚才激发 E_3 空穴相同的单色光电离 E_2 和 E_3 的空穴, 记下相应的电容瞬态 $\Delta C_{2+3}(t, h\nu)$, 利用 $\Delta C_{2+3}(t, h\nu) - \Delta C_3(t, h\nu)$ 是否是单一指数时间函数可以确定 E_2 和 E_3 是否耦合. 又如已经知道 E_1 和 E_2 之间以及 E_2 和 E_3 之间都不是耦合关系, 要进一步研究 E_1 和 E_3 的关系时, 可以在样品由零偏置变为反向偏置后, 用 $E_1 - E_v < h\nu < E_2 - E_v$ 的光把 E_1 的空穴电离掉. 待结电容稳定后, 用 $E_3 - E_v < h\nu < E_c - E_2$ 的单色光电离掉 E_2 和 E_3 的空穴, 记下光电容瞬态 $\Delta C_{2+3}(t, h\nu)$. 再使样品变为零偏置, 并待所有深能级为空穴饱和和填充后使之回到反向偏置, 用和刚才获得 $\Delta C_{2+3}(t, h\nu)$ 相同的单色光电离所有深能级的空穴, 记下相应的光电容 $\Delta C_{1+2+3}(t, h\nu)$. 由于 E_2 与 E_1 和 E_3 两能级都是无关的, $\Delta C_{1+2+3}(t, h\nu)$ 和

$\Delta C_{2+3}(t, h\nu)$ 包含 E_2 能级的贡献是完全相同的, 所以 $\Delta C_{1+2+3}(t, h\nu) - \Delta C_{2+3}(t, h\nu)$ 和 $\Delta C_{1+3}(t, h\nu) - \Delta C_3(t, h\nu)$ 是等价的, 用它是否具有单一指数时间函数行为, 可以判别 E_1 和 E_3 是否属于同一深中心。

三、硅中和金有关能级归属的判别

1. 样品制备

先用硅平面工艺做好 n^+-p 结, 然后将纯度为 99.999% 的金真空蒸发在样品的背面。在 820°C 的氮气中扩金两个小时。将样品扩磷区表面上的氧化层光刻腐蚀掉, 正面蒸铝, 反刻出铝电极。为了便于透光, 铝电极的面积很小, 它仅为扩磷区面积的 2%。背面蒸铝并在 500°C 的氮气中扩金 30 min, 以便形成良好的欧姆接触。经 DLTS 测量证实样品中含有和金有关的施主和受主两能级, 并且它们的浓度比浅受主硼的浓度小一个数量级以上。

2. 测量和计算

将样品恒温在 87 K 上。施加在样品上的反向偏压为 6 V。实验开始时, 将样品的两端短路, 待其中的施主和受主两能级都填满空穴之后, 让样品回到反向偏置, 并立刻用事先选好波长的光照射样品和记录下相应的光电容瞬态。根据和金有关的施主和受主能级在硅禁带中的位置分别约为 $E_v + 0.35 \text{ eV}$ 和 $E_c - 0.54 \text{ eV}$ 的实验结果^[5-7], 选了 $h\nu = 0.56 \text{ eV}$ 和 0.76 eV 两种光子能量的光作实验。在样品中的深能级为空穴填满后, 先用 0.56 eV 的光照射样品, 把空间电荷区中 E_a 能级的空穴电离掉, 而 E_a 上的空穴依然如故。当 E_a 能级的空穴光电离产生的电容瞬态 $\Delta C_D^+(t, 0.56 \text{ eV})$ 达到稳定以后, 把光换成 0.76 eV 的, 这时, 单纯 E_c 能级空穴的光跃迁所对应的电容瞬态为 $\Delta C_D^+(t, 0.76 \text{ eV})$, 见图 4。接着让样品再度变为零偏置, 待其中的所有深能级为空穴填满后, 将偏压变为反向

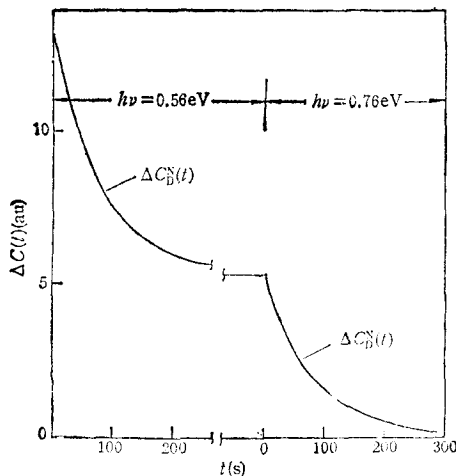


图4 依次用 0.56 eV 和 0.76 eV 光照后, 扩金 n^+-p 结的光电容瞬态

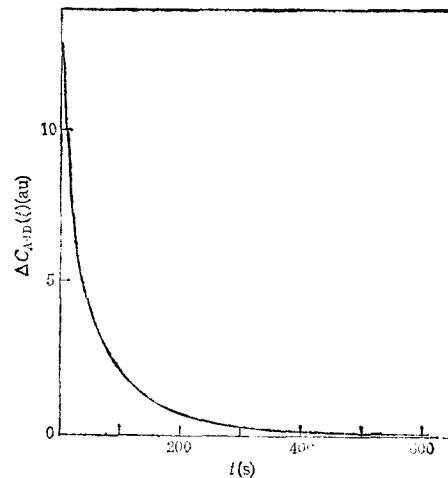


图5 用 0.76 eV 光激发硅中金施主和受主两能级的光电容瞬态

偏置,并用 0.76 eV 的光照射样品,得到 E_d 和 E_a 能级空穴光电离所产生的电容瞬态 $\Delta C_{a+d}(t, 0.76 \text{ eV})$, 见图 5. 由 $\Delta C_{a+d}(t, 0.76 \text{ eV})$ 减 $\Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})$ 的差如图 6

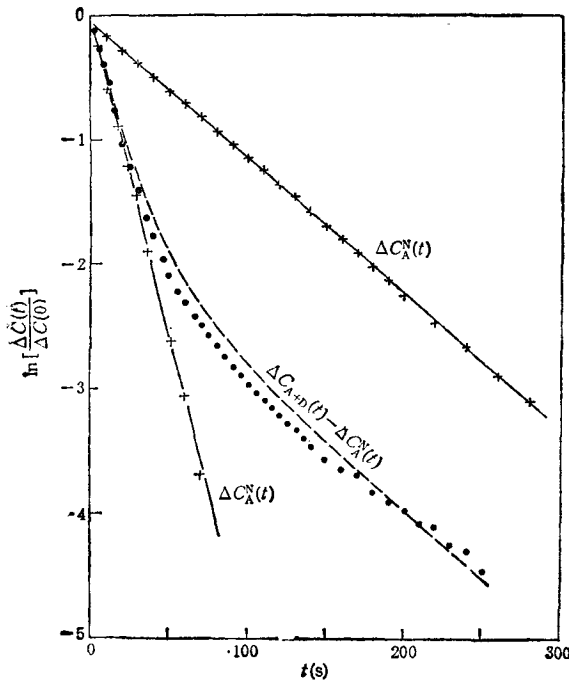


图 6 硅中和金有关的 E_d 和 E_a 能级的光电容瞬态与单纯 E_a 的光电容瞬态之差虚线是利用(29)式计算的结果

所示. 为了便于比较,把 $\Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})$ 和 $\Delta C_{a+d}(t, 0.76 \text{ eV})$ 也划在图中. 从图 6 中可以看出两点: 1) $\Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})$ 的单指数性是很好的,说明测量系统是可靠的. 2) $\Delta C_{a+d}(t, 0.76 \text{ eV}) - \Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})$ 的差的对数与时间 t 不呈线性关系,即这一差不是单一指数时间函数,而是多指数时间函数,而且在 $t < 20 \text{ s}$ 范围内,曲线的斜率和 $\ln[\Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})]$ 的斜率相近,在 $t > 100 \text{ s}$ 范围内,曲线变得几乎和 $\ln[\Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})]$ 平行. 这就意味着 $\Delta C_{a+d}(t, h\nu) - \Delta C_a^0(t, h\nu)$ 包含着 $\exp[-t/\tau_d(h\nu)]$ 和 $\exp[-t/\tau_a(h\nu)]$ 两个指数时间函数,在 $h\nu = 0.76 \text{ eV}$ 时,两指数的时间常数分别为 $\tau_d = 19.4 \text{ s}$ 和 $\tau_a = 92.1 \text{ s}$. 将上述实验数据代入(28)式,可得

$$\begin{aligned} & [\Delta C_{a+d}(t, 0.76 \text{ eV}) - \Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})] / \Delta C_a^0(0, 0.76 \text{ eV}) \\ & = 0.834 \exp(-t/19.4 \text{ s}) + 0.166 \exp(-t/92.1 \text{ s}). \end{aligned} \quad (29)$$

图 6 中用虚线示出这一结果. 由图 6 可见,在测量误差范围内,虚线和直接测量的 $\Delta C_{a+d}(t, 0.76 \text{ eV}) - \Delta C_a^0(t, 0.76 \text{ eV})$ 是一致的. 这就证明硅中和金有关的 E_d 能级和 E_a 能级属于同一深中心,而不是象文献[2]所说的,它们是属于不同的中心.

四、结 论

上述测量与分析证明了硅中和金有关的施主和受主两能级是属于同一中心的. 这一结果和文献[1]的看法是一致的. 文献[1]的研究结果是很有意义的,但它的研究方法本身有一些不足之处,如测量步骤较繁,测量时间长,这就有可能由于测量仪器的零点漂移,放大倍数的不稳定,以及杂散光和长波辐射的存在等给测量结果带来严重的误差;另一不足的是假设了金施主能级的光电容瞬态初值 $\Delta C_a^0(0, h\nu)$ 在 $h\nu = 0.50 \text{ eV}$ 时和在 $h\nu = 0.72 \text{ eV}$ 时具有相同的数值. 而这在理论上和实践上都是很难做到的,因为 E_d 能级束缚载流子的光电离截面 $\sigma^0(h\nu)$ 是 $h\nu$ 的函数,而且光通量 ϕ 往往也是 $h\nu$ 的函数,这将导致空间电荷区中 E_d 能级束缚载流子的有效光电离宽度 X_d^0 是 $h\nu$ 的函数,从(22)式可

知 $\Delta C_3^2(0, h\nu)$ 是随 $h\nu$ 的不同而变化的。

本文在研究深能级之间耦合与非耦合两种情况对应的光电容瞬态的本质差别的基础上, 提出判别两个或两个以上深能级是否属于同一中心的方法。它能在很大的程度上避免了文献[1]方法的缺点, 而且具有如下优点:

- 1) 简单、直观、测量时间短、判断准确。
- 2) 能够判断两个以上的多个深能级组成的复杂系统。
- 3) 在被判断的两个深能级之间可以有第三个能级存在。

总之在半导体中, 经常存在着多个深能级需要研究。本文提出的方法对于判别它们是否属于同一中心的问题是有意义的。

作者曾和秦国刚教授作过多次有益的讨论; 邢妙香、常锦莲等协助做了样品。在此表示感谢。

- [1] L-A Ledebø and Zhan-Guo Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **42**(1983), 680.
 [2] D. V. Lang, H. G. Grimmeiss and E. Meijer, *Phys. Rev.*, **B22**(1980), 3917.
 [3] 陈开茅、秦国刚、王忠安、金洒轩, 物理学报, **33**(1984), 486.
 [4] 陈开茅、秦国刚, 半导体学报, **7**(1986), 298; *Chin. Phys.*, **7**(1987), 248.
 [5] C. T. Sah, L. Forbes, *Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 145.
 [6] 秦国刚等, 半导体学报, **2**(1981), 169; *Chin. Phys.*, **2**(1982), 820.
 [7] 陈开茅、毛晋昌, 半导体学报, **4**(1983), 142.

A METHOD FOR DETERMINING IF TWO OR MORE DEEP LEVELS BELONG TO THE SAME CENTER

CHEN KAI-MAO JIN SI-XUAN WU LAN-QING TAN XUE-QING

Department of Physics, Peking University

(Received 24 October 1988)

ABSTRACT

In this paper two kinds of photocapacitance transients, corresponding respectively to two cases of coupling and uncoupling of two or more deep levels have been studied in detail. According to the great difference of the two kinds of the photocapacitance transients, a method of determining if two or more deep levels belong to the same center has been suggested. It has some advantages that it can be used to measure the sample including more than two deep levels, the processes are quite simple, and it takes short time to finish a measurement. For example, this method has been used to judge the donor and acceptor levels related to gold in Si. The result has proved that they belong to the same center related to gold in Si.