

测量半导体中深中心分布的双相关技术

晏 懋 洵

(北京大学物理系)

自 1974 年 D. V. Lang^[1] 提出深能级瞬态谱技术 (DLTS) 以来, DLTS 已经成为研究半导体中深能级杂质, 缺陷 (以下统称深中心) 的物理性质的广泛使用的有效手段。例如, 通过 DLTS 测量可以得到深中心的浓度、俘获截面、能级位置等。1977 年 H. Lefève 和 M. Schulz^[2] 提出了双相关 DLTS 技术 (DDLTS), 采用 DDLTS 技术可以方便地测量半导体中深中心的分布。测量半导体中深中心的分布在许多问题中是很重要的。例如在研究辐射损伤产生的深中心问题中, 如果我们测得各个能级在经过不同温度退火过程后的浓度分布, 则可判明哪些能级是属于同一个深中心。又如通过测量某种深中心在不同条件下的浓度分布进而研究其运动 (或扩散) 的规律, 这对于识别深中心的性质是十分有益的。目前在双相关测量中采用的是四通道取样平均器, 即用四个 M164 和两个 M162。我们采用双通道取样平均器, 即用两个 M165 和一个 M162 同样能实现双相关测量。

一、基本原理

根据 DLTS 原理^[1,3], 在反向偏压为 V_r 的二极管上叠加一个脉冲电压, 使反向偏压减至 V_p 。这时相应的耗尽区宽度从 $x(-V_r)$ 减至 $x(-V_p)$ 。由于体内深中心在脉冲期间的填充和发射, 脉冲过后结电容发生瞬时变化 ΔC_0 。显然, $\Delta C_0 \cdot \exp(-t/\tau)$, ΔC_0 与所填充的深中心成正比。如果在第一个脉冲之后间隔一定时间, 又叠加另一脉冲电压使反向偏压减至 V'_p , 耗尽区宽度

相应地减至 $x(-V'_p)$, 则第二个脉冲过后的电容瞬态变化是 $\Delta C'_0 \exp(-t/\tau)$ 。显然, $\Delta C_0 - \Delta C'_0$ 反映了两次脉冲重叠的区域中深中心的贡献 (见图 1)。若固定 V_p , V'_p 的大小, 改变 V_r , 则可使重叠区域在体内扫过。由此可以想象用一个双脉冲信号源来连续产生 V_p , V'_p , 用四通道 boxcar 对两次脉冲后的电容瞬态进行“率窗”处理, 从而确定深中心浓度分布。

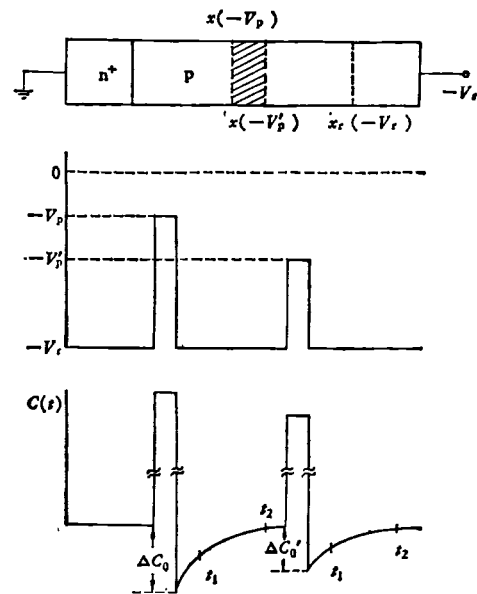


图 1 叠加在反向偏压上的双脉冲所确定的观测区及相应的电容瞬态

图 2 是含有深中心的 p^+n 二极管加一定反向偏置电压后的能带图。因为空间电荷区主要在 n 区一边, 因此只画了 n 区边的情况。两次脉冲后空间电荷区的变化及深中心的填充情况也标在图上。其中 x_{tr} 是反偏压 V_r 时费密

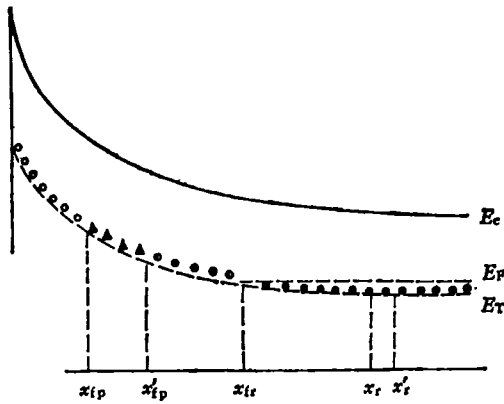


图2 p+n 二极管加一定反向偏压后的能带图

- E_F 以上填充的深中心;
- ▲ 观测区中被填充的深中心;
- E_F 以下填充的深中心;
- 未填充的深中心

能级 E_F 和深中心能级 E_T 的交点. x_{ip}, x'_{ip} 分别是加脉冲 V_p, V'_p 之后 E_F 和 E_T 的交点. x_{it} 和 x'_{it} 之间的区域就是所确定的观测区. $x_i(t), x'_i(t)$ 分别是每次脉冲之后恢复到原来反向偏压时, 由于部分深中心在脉冲期间被填充而造成的空间电荷区宽度的变化, 它是时间的函数.

根据以上分析, 求解泊松方程可得到深中心浓度公式^[2]:

$$n_T(x_{ip}, x'_{ip}) = 2(\epsilon_0 \epsilon_s A)^2 N_0(x_i) \times \frac{\Delta C_0 - \Delta C'_0}{C_T^3} \cdot \frac{1}{x_{it}^2 - x'_{it}{}^2}, \quad (1)$$

其中 A 是二极管的结面积, ϵ_0 是真空中电容率, ϵ_s 是硅的介电常数, C_T 是相应偏压下的结电容, $N_0(x_i)$ 是净的浅杂质浓度.

如果在第一个脉冲之后, 我们用一个双通道 boxcar 对其产生的电容瞬态在 t_1, t_2 时刻进行定点取样, 从它的差值输出得

$$\begin{aligned} \Delta C &= \Delta C(t_1) - \Delta C(t_2) \\ &= \Delta C_0(e^{-t_1/\tau} - e^{-t_2/\tau}). \end{aligned}$$

同样, 用另一个双通道 boxcar 对第二个脉冲后的电容瞬态在相同的延迟时间 t_1, t_2 取样, 得

$$\begin{aligned} \Delta C' &= \Delta C'(t_1) - \Delta C'(t_2) \\ &= \Delta C'_0(e^{-t_1/\tau} - e^{-t_2/\tau}), \end{aligned}$$

其差值信号为

$$\begin{aligned} S(x'_{ip}, x_{ip}) &= \Delta C - \Delta C' \\ &= (\Delta C_0 - \Delta C'_0)(e^{-t_1/\tau} - e^{-t_2/\tau}). \end{aligned} \quad (2)$$

它反映了观测区 (x_{ip}, x'_{ip}) 内深中心的贡献. 如果同时对样管进行温度扫描 (在测量中一般是让样管从液氮温度到室温线性缓慢地变化), 则填充在深中心上的载流子的发射时间常数 τ 也将变化, 因而双相关输出 S 也会变化. 对(2)式求极值, 当

$$\tau = \tau_m = (t_2 - t_1) / \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (3)$$

时, S 达到极大值 S_m . 由 S_m 的值就可定出

$$\Delta C_0 - \Delta C'_0 = S_m / (e^{-t_1/\tau_m} - e^{-t_2/\tau_m}). \quad (4)$$

由(3)式可以看到, 双相关法所确定的“率窗”和 DLTS 所确定的“率窗”是相同的. 利用发射公式

$$e_n = \frac{1}{\tau} = \sigma_n \langle v_n \rangle N_c \frac{1}{g} e^{-\Delta E/kT}, \quad (5)$$

其中 σ_n 是电子俘获截面, $\langle v_n \rangle$ 是电子平均热运动速度, N_c 是导带底能态密度, g 是简并因子, $\Delta E = E_c - E_T$, E_c 是导带底能量. 从(2), (3), (5)式可以看到, 如果改变取样时间 t_1 和 t_2 , 则 S 出现极大值的温度 T_m 就不同. 又由于 $\langle v_n \rangle N_c$ 与 T^2 成正比, 若假定 σ_n 与温度无关, 则 $\ln \frac{1}{\tau_m T_m^2}$ 与 $\frac{1}{T_m}$ 是直线关系. 由其斜率可确定深中心能级位置

$$\Delta E = E_c - E_T;$$

而由其截距可求得俘获截面.

二、测量装置

利用两个 M165 代替四通道 boxcar 作上述问题的双相关测量的电路连接如图 3 所示. 图 3(a) 是检测电容瞬态的高频电容电桥. 图 3(b) 是利用 boxcar 对电容瞬态作双相关处理. 图 3(c) 是 M165 的交替取样触发信号. 我们利用了 M165 具有交替取样的功能, 并将基线取样改作对瞬态电容在 t_2 时刻的定点取样. 这样一来, 从主机 M162 的 (A - B) 输出的就是

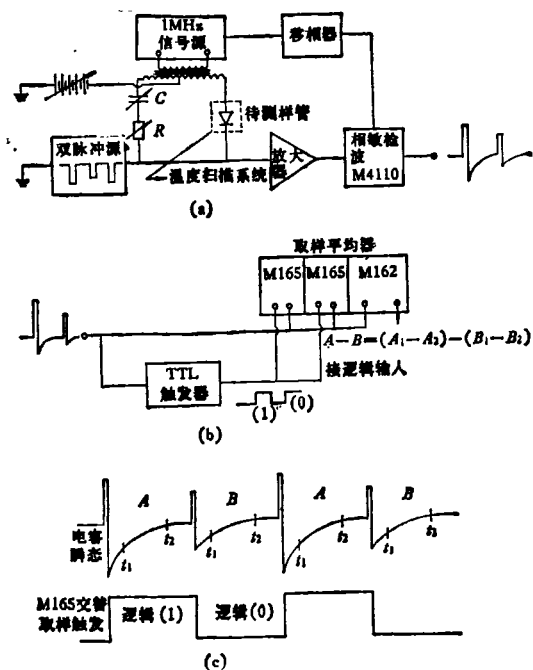


图3 用 boxcar 作双相关测量的电路图

$$S = [\Delta C(t_1) - \Delta C(t_2)] - [\Delta C'(t_1) - \Delta C'(t_2)] - (\Delta C_0 - \Delta C'_0)(e^{-t_1/\tau} - e^{-t_2/\tau}),$$

(1) 式中 $N_0(x)$ 是按熟知的公式

$$N_0(x) = \frac{-1}{g e_0 e_s A^2} \cdot \frac{C^3}{dC/dV} \quad (6)$$

来计算。样管的电容-电压关系直接由 $C-V$ 图示意画出, 测量电路如图 4 所示。

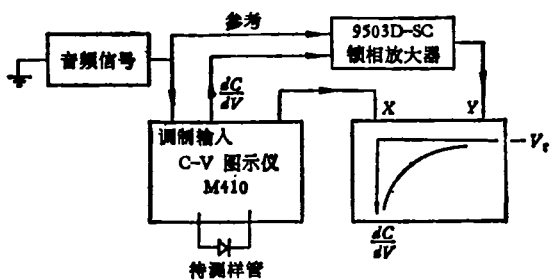


图4 浅杂质测量电路图

三、测量步骤及结果

根据公式(1), 要测量深中心分布 n_T , 必须先测量 $N_0(x)$, $(\Delta C_0 - \Delta C'_0)$, C_t , x_{tp} 和 x'_{tp} 。为此按以下步骤进行测量:

(1) 先画出二极管的 $C-V$ 关系曲线, 求得不同偏压下耗尽区宽度, 从而确定脉冲期间空间电荷区收缩的位置 x_p , x'_p 。

(2) 利用图 4 的电路和公式(6) 测量 $N_0(x)$ 。

(3) 在一组固定的脉冲 V_p , V'_p 下, 对不同的偏压进行双相关 DLTS 温度扫描。由每个偏压下相关器的输出峰值 S_m , 得到该偏压下所确定的观测区中深中心对电容瞬态的贡献 $(\Delta C_0 - \Delta C'_0)$ 。另外, 由

$$\ln(1/\tau_m T_m^2) \propto 1/T_m,$$

可求得深中心的能级位置 E_T 。根据

$$E_F - E_T = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_s} \int_{x_{tp}}^{x_p} (x_p - x) N_0(x) dx,$$

可求得边缘区宽度 $(x_p - x_{tp})$ 和 $(x'_p - x'_{tp})$ 。从而确定 x_{tp} 和 x'_{tp} , 这样就确定了每次测量的观测区 (x_{tp}, x'_{tp}) 。

我们测量了 n^+p 掺金二极管中金的分布。结果示于图 5 中。可以看到在结区附近, 金的浓度下降了几倍, 这是由于 n^+ 区中磷对金的提取作用。另外, 当深中心浓度较高时, 用一般 $C-V$ 法来测量浅杂质浓度已不适用^[4]。我

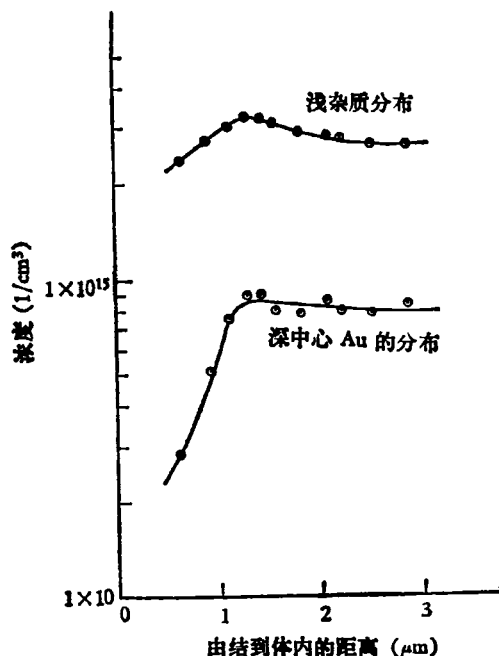


图5 浅杂质和深中心浓度分布

(下转第 409 页)