第3卷 第2期 半导体学报 Vol. 3, No. 2
1982年3月 CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTOR Mar., 1982

用 C–V 法同时测量半导体中深中心和浅杂质的浓度分布

秦国刚 杜永昌 张玉峰
(北京大学物理系)
1981年4月9日收到

提要

测量半导体深中心浓度分布和测量浅杂质浓度分布一样，是一个十分重要的问题. 本文提出用 C–V 法同时确定半导体中深中心和浅杂质浓度分布的方法，在深中心浓度和浅杂质浓度可比的情况下，它的结果尤为精确. 文中讨论了测试原理和测试方法并以掺金硅 N^+-P 结二极管和汽相外延N型砷化镓肖脱基二极管为例进行了测量.

一、引　言

测量半导体中浅杂质的分布是十分重要的，浅杂质的分布通常是用 C–V 法来确定的；测量半导体中深中心的分布在许多问题中同样很重要. 例如在研究辐射损伤产生的深中心问题中，如果某几个能级在不同温度范围的退火过程中具有相同的浓度分布，则有助于判定这些能级是否属于同一个深中心. 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，对于识别深中心的性质是十分有益的. 目前一般用瞬态电容的方法来确定深中心的浓度分布，但测试较复杂[1]，设备比较昂贵[2]. 同时由于一般深中心分布的测量是以浅杂质分布的测量为前提的，在深中心与浅杂质数量相接近的情况下，用通常 C–V 法测定的浅杂质分布由于没有考虑到深中心的存在，浅杂质分布测量就有较大误差，因而由此求出的深中心的分布也误差较大. 本文提出，如果深中心的浓度较高(例如超过浅杂质的 1/100)，则可用测浅杂质分布的 C–V 测试仪器(例如 PAR Model 410 C–V Plotter) 分别在两个特定状态下测量 C–V 曲线，就可方便地同时确定深中心和浅杂质的浓度分布. 尤其在深中心与浅杂质浓度相接近的情况下，不考虑深中心的存在而单独测得浅杂质的分布是不可能的，必须同时确定深中心和浅杂质的分布. 用本文提出的方法测量的结果较为精确.

二、原　理

为了讨论方便，设有一 P^+–N 结，在N型半导体内浅杂质浓度为 $N_D(x)$，在禁带上半部有一受主深中心，能量为 E_T，浓度为 $N_T(x)$. 造成如图1所示的两个特定的深中心荷电状态 (a) 和状态 (b)，在同一温度下测量状态 (a) 和状态 (b) 的 C–V 曲线，如图2示.

状态(a)和状态(b)具有相同的空间电荷区宽度W时对应偏压分别是V_a和V_b.

由泊松方程

$$\frac{1}{\varepsilon}\int_0^W x\rho(x)dx=(V_R+V_D) \tag{1}$$

对状态(a)有

$$\frac{\varepsilon}{q}(V_D+V_a)=\int_0^W xN_D(x)dx-\int_{x_1}^W xN_T(x)dx, \tag{2}$$

对状态(b)有

$$\frac{\varepsilon}{q}(V_D+V_b)=\int_0^W xN_D(x)dx-\int_{x_2}^W xN_T(x)dx. \tag{3}$$

其中ε是半导体介电常数,$\rho(x)$是空间电荷区中的电荷密度,V_R是反偏压,V_D是自建势,q是单位电荷电量,x_1和x_2分别是零偏压和反偏压下费米能级E_F和深中心E_T的交点(见图1).

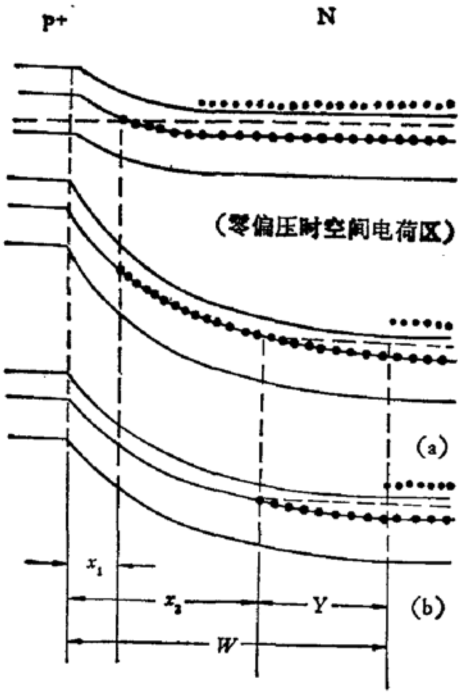

图1 P+-N 结空间电荷区能带示意图 (a)电子冻结在深中心上. (b)空间电荷区中费米能级以上深中心上的电子全部发射

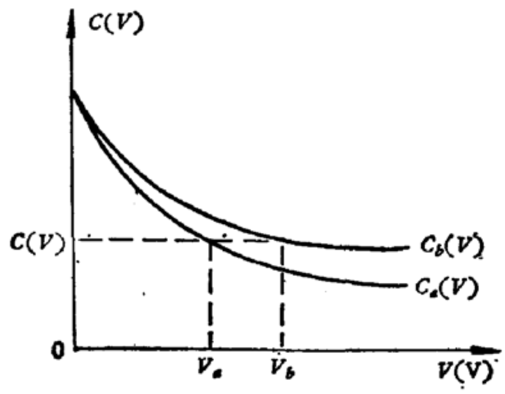

图2 两个特定状态下的 C-V 曲线. $C_a(V)$是状态(a)的C-V曲线,$C_b(V)$是状态(b)的C-V曲线,同一电容$C(V)$对应的偏压是V_a和V_b

对式(2)微分得到

$$N_D(W)-N_T(W)=-\frac{1}{\varepsilon qA^2}\cdot\frac{C_a^3(V)}{\frac{dC_a(V)}{dV_a}}, \tag{4}$$

定义 $n_d(W)=N_D(W)-N_T(W)$.

(3)减去式(2),并微分得到

$$N_T(x_2)=\frac{2}{\varepsilon qA^2}\cdot\frac{1}{1-\frac{Y(W)}{W}}\cdot\frac{1}{1-\frac{dY(W)}{dW}}\cdot\frac{d(V_b-V_a)}{dC^{-2}(V)}, \tag{5}$$

其中A是结面积,$Y(W)=W-x_2$是空间电荷区边缘区宽度,$C_a(V)$是状态(a)的电

容值，$C_b(V)$ 是状态 (b) 的电容值. 空间电荷区宽度 $W = \frac{\varepsilon A}{c}$. 只要测得了状态 (a) 和状态 (b) 的 C-V 曲线，结合式 (4) 和 (5) 就可同时得到浅杂质和深中心浓度分布.

边缘区宽度 $Y(W)$ 是用瞬态电容法精确测定深中心浓度分布时必须涉及的一个重要参数.[1] 也是许多深能级问题中都要涉及的一个重要参数[3]. 对边缘区应用泊松方程得到

$$\int_{W-Y}^{W} [x - W + Y(W)] n_d(x) dx = \frac{\varepsilon}{q} \phi_T(W), \tag{6}$$

其中

$$q\phi_T(W) = E_F(W) - E_T = (E_C - E_T) - KT \ln \frac{N_A(W)}{n_d(W)}.$$

在一般情况下求解式(6)所示的积分方程确定 $Y(W)$. 如果 $n_d(x)$ 随 x 的变化不是太快，式 (6) 可以简化为

$$\frac{dn_d(W)}{dW} Y^3(W) - 3n_d(W)Y^2(W) + \frac{6\varepsilon\phi_T(W)}{q} = 0. \tag{7}$$

这时可以通过解式 (7) 的三次方程确定 $Y(W)$，当 $dn_d(W)/dW \to 0$ 时

$$Y(W) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\phi_T(W)}{n_d(W)q}}. \tag{8}$$

利用式 (5) 计算 $N_T(x_2)$ 的步骤如下：由于 $C = \frac{\varepsilon A}{W}$；图(2)所示的一定电容 C 对应于一定的空间电荷区宽度 W，利用式 (4) 和 (6) 则可计算出所对应的 $Y(W)$；作 $W \sim Y(W)$ 曲线计算出 $dY(W)/dW$；利用图 2 作 $C^{-2} \sim (V_b - V_a)$ 曲线计算出 $d(V_b - V_a)/dC^{-2}$；而 $x_2 = W - Y(W)$.

三、测试方法和结果

如前所述，只要测得了两个特定状态 (a) 和状态 (b) 的 C-V 曲线，结合式 (4) 和 (5) 就可以确定 $N_D(x)$ 和 $N_T(x)$. 如何实现状态 (a) 和状态 (b) 呢？仍以前述的 P^+-N 结为例：将样品降到足够低的温度(但应保证浅杂质全部电离)，使电子"冻结"在深能级上. 对于某些研究较充分的深中心，可以参考文献上所载的电子热发率 $e_n(T)$ 的数据估算应降低的温度；对于某些未知的能级，也可用 DLTS 或热激电容法测出 $e_n(T)$ 然后估算应降低的温度. 总之，降到低温后，(例如 100 K 左右)如果从零偏压扫到反偏压，紧接着又从反偏压扫到零偏压所作的二条 C-V 曲线完全重合，则说明在这个温度下电子已完全冻结在深中心上，所作的曲线就是状态 (a) 的 C-V 曲线. 在室温或更高的温度下，首先加上反偏压，让空间电荷区中费米能级以上深中心上的电子全部发射(利用 $e_n(T)$ 的数据估算电子全部发射的温度)，然后降温到和状态 (a) 同一温度，测量不同偏压下对应的平衡电容值即可做出状态 (b) 的 C-V 曲线.

图 3 示出了一个掺金硅 N^+-P 二极管的测量结果. 二极管面积 $A = 4.54 \times 10^{-3}$ cm^2. 金在硅中有二个能级[4]，一个是施主型能级，位于禁带下半部 $E_{T1} = E_V + 0.35$ eV，另一

个是受主型能级，位于禁带中央附近 $E_{T2}=E_C-0.54$ eV．对于 E_{T2} 来说，由于处于禁带中央偏上，基本为空穴所充满，对前述问题影响很小，可以忽略，因而可以当单个深能级处理．为了测量两个特定状态下的 $C-V$ 曲线，首先在室温下对 N^+-P 二极管反偏，这时空间电荷区中费米能级以下深中心能级 E_{T2} 上空穴全部发射．在 -20 V 到零 V 的不同偏压下分别从室温降到 94 K 并测量所对应的电容值，所作 $C-V$ 曲线近似是前面提到的(b)状态的曲线．在 94 K 从零偏压到 -20 V 作 $C-V$ 曲线就相当于前面提到的 (a) 状态的 $C-V$ 曲线．由测得的两条 $C-V$ 曲线结合方程 (4) 及 (5) 则可确定金的分布 $N_T(x)$ 和浅杂质硼的分布 $N_D(x)$．

图 4 示出了汽相外延 N 型砷化镓肖脱基二极管中深中心和浅杂质的分布．由于这个深中心的能量一般在 $E_T=E_V+0.71\sim0.75$ eV，是受主型深中心[5,6]．因而降温到 250 K 左右就可以满足状态 (a)，而在实现状态 (b) 时，则须升温到较高温度(例如 400 K)才能使空间电荷区中费米能级以上深中心上的电子全部发射．

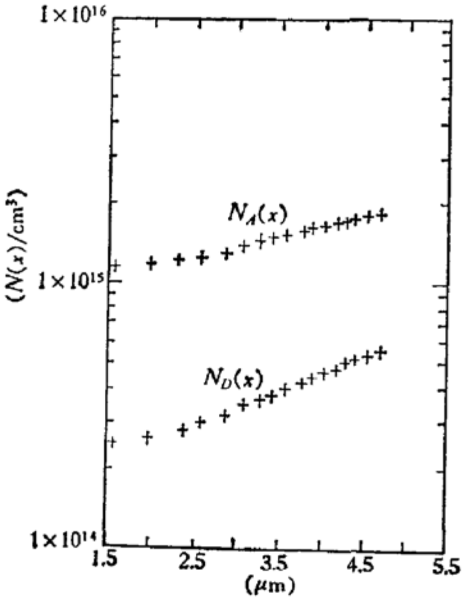

图 3 掺金硅 N⁺-P 二极管中浅杂质硼和深中心金的浓度分布

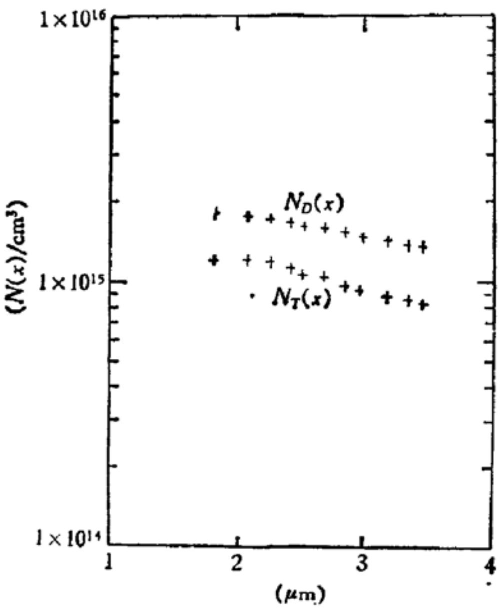

图 4 汽相外延 N 型砷化镓肖脱基二极管中深中心 B 能级和浅杂质的浓度分布

四、讨论和结论

在深中心和浅杂质可以相比的情况下，不可能单独确定浅杂质的分布(而不考虑深中心)，即不可能用通常的 $C-V$ 法正确地测得浅杂质的浓度分布．例如本文测试的汽相外延 N 型砷化镓肖脱基管，在室温下测得的 $C-V$ 曲线和扫描速度有关，如图 (5) 所示．这就不可能正确地确定浅杂质分布．因此，对于 $N_D(x)$ 和 $N_T(x)$ 可以相比的情况下，用本文提出的方法同时确定 $N_D(x)$ 和 $N_T(x)$ 较其它方法更为精确．

对于很浅的深中心，用本文提出的方法有局限性，因为这时实现状态 (a) 的温度可能比浅杂质全部电离的温度还要低；对 $N_T(x)\ll N_D(x)$ 的情况，用电容瞬态的方法[1,2]求

出的 $N_T(x)$ 较本方法精确．对于 $N_T(x)$ 是 $N_D(x)$ 的 $\frac{1}{100}$ 时，仍可用本方法较精确地求出其分布．

对于 P^+-N 结，当深中心是施主型能级时，(5) 仍适用，(4) 应改为

$$n_d(W)=N_D(W)=-\frac{1}{\epsilon qA^2}\cdot\frac{C_a^3(V)}{\frac{dC_a(V)}{dV_a}}. \qquad (4')$$

如果是 N^+-P 结，$N_D(W)$ 相应于 $N_A(W)$．施主型深中心相应于 (4) 而受主型深中心相应于 (4′)．

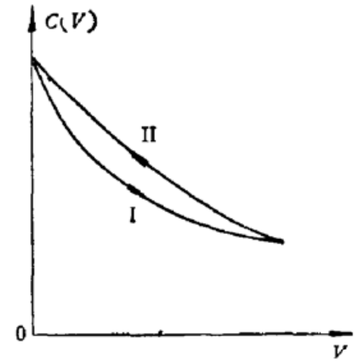

图 5　汽相外延N型砷化镓肖脱基二极管在室温下的 C-V 曲线 (I) 由零偏压 V 很快扫到反偏压 (II) 再由反偏压 V 慢慢扫到零偏压

虽然 (4) 和 (4′) 的右方和通常用 C-V 法求得浅杂质分布的公式

$$N_D(W)=-\frac{1}{\epsilon qA^2}\frac{C^3(V)}{\frac{dC(V)}{dV}} \qquad (9)$$

具有相似的形式，但其本质含意是不同的．如前所述，(4) 和 (4′) 中的 $C_a(V)$ 是电子冻结在深中心上(即状态 (a)) 的电容值，而 (9) 中 $C(V)$ 是指通常在室温下测出的高频电容值．对于硅的情况，在室温下深中心上电子发射很快，因此 (9) 中的 $C(V)$ 接近于本文的 $C_b(V)$．

在某些工作中，只须要知道深中心的大概数量而无须求其精确分布时，一般用瞬态电容的方法估算深中心的浓度[6]．

$$N_T=2N_D\frac{\Delta C_0(V)}{C_\infty(V)} \qquad (10)$$

其中 $C_\infty(V)$ 是反偏压 V 下的电容，$\Delta C_0(V)$ 是瞬态电容，$\Delta C_0(V)=C_\infty(V)-C_0(V)$，如图 (6) 所示．

这里要指出，只要测出了 $C_a(V)$ 和 $C_b(V)$，就可以用下式估算 N_T

$$N_T=2N_D\frac{C_b(V)-C_a(V)}{C_b(V)}. \qquad (11)$$

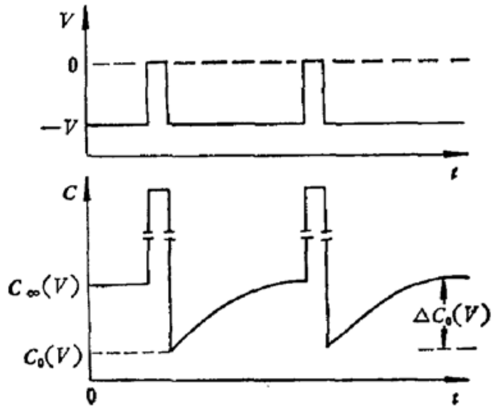

图 6　脉冲和电容瞬态

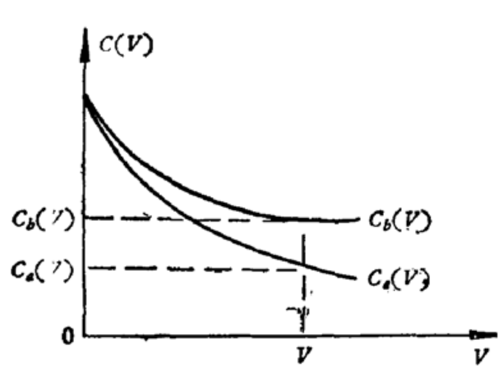

图 7　状态 (a) 和状态 (b) 的 C-V 曲线，某一电压 V 下的 $C_b(V)$ 和 $C_a(V)$ 之差相应于电容瞬态 $\Delta C_0(V)$

这是因为在瞬态电容方法中，当脉冲来临之前，深中心上电子均已完全发射，相当于本文中的状态(b)，即 $C_\infty(V)=C_b(V)$. 施加脉冲后深中心上填满电子，这相当于本文中的状态(a)，即 $C_0(V)=C_a(V)$. 因此，

$$\Delta C_0(V)=C_\infty(V)-C_0(V)=C_b(V)-C_a(V),$$

如图7所示. 用瞬态电容的方法设备复杂，而本方法只须作两个特定荷电状态下的 C–V 曲线即可求出 $\Delta C_0(V)$，其方便是显而易见的.

对于同时存在多个深中心的情况，可用类似于单个深中心能级的讨论方法进行讨论. 例如有 m 个能级，如果这些深级之间能量差 $\gg k_T$，则可造成 $m+1$ 个荷电状态，作出 $m+1$ 条 C–V 曲线，同时确定浅杂质和各个深能级的浓度分布.

本工作曾和吴书祥、晏懋洵、陈开茅等同志作过不少有益的讨论，作者在此表示谢意.

参 考 文 献

[1] C. T. Sah, *Solid-state Electronics*, **19**, 975 (1976).
[2] M. Schulz, *Appl. Phys.*, **12**, 45 (1977).
[3] C. T. Sah and J. W. Walker, *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 384 (1973).
[4] C. T. Sah et al., *Appl. Phys. Lett.*, **15**, 145 (1969).
[5] D. V. Lang et al., *J. Appl. Phys.*, **47**, 1533 (1976).
[6] A. H. Humbert et al., *Appl. Phys.*, **9**, 117 (1976).
[7] A. Neugroschel and C. T. Sah, *IEEE. Trans. on Electron Devices*, **ED-23**, 1131 (1976).

Simultaneous Measurement of Profiles of Deep Levels and Shallow Impurities with the *C-V* Method

Qin Guogang, Du Yongchang and Zhang Yufeng

(Department of Physics, Beijing University)

Abstract

The measurement of the profile of deep levels in semiconductors as well as that of the profile of shallow impurities, is a problem of great importance. We suggest a procedure for measuring simultaneously the profile of deep levels and shallow impurities with *C-V* method. The results are especially accurate when the density of the deep levels is comparable with that of shallow impurities. The principle and method of measurement is presented and we give results of measurements on an N^+-P junction of gold-doped silicon and on a Schottky barrier of VPE N-type GaAs.