

准静态—高频c-v联合技术测量 界面态的分布

张久惠 王正荣 沈桂芬

(物理系)

本文介绍了用准静态—高频c-v联合技术测量界面态分布的原理^[1]。详细阐述了测量方法，给出几种典型样品中界面态密度在禁带中按能量的分布。对测量结果做了较详细的分析。

1. 前 言

在Si-SiO₂界面存在的界面态在禁带中起复合中心作用，使晶体管β下降， $\frac{1}{f}$ 增加，对CCD器件的转移效率有直接影响。因此界面态的测量对改进工艺，提高产品质量将有重要的指导意义。

本文介绍的测试技术特点是：

①测试设备简单、测量迅速；②测量范围在禁带中央0.6eV附近；③精度可达 $10^{10}/\text{cm}^2\cdot\text{eV}$ 。所以此技术可广泛应用于生产实践。

2. 基本原理

① Si-SiO₂界面态电容与MOS结构的等效电路

在交流信号下，界面态能迅速地与体内交换电荷，体现出电容效应叫界面态电容C_{ss}，它正比于界面态密度N_{ss}^[2]。考虑界面态电容之后，MOS系统的等效电路如图1所示。

理想MOS结构等效电路如图2所示。

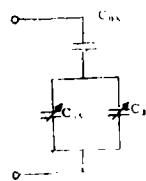
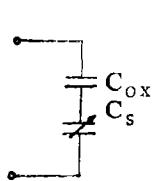


图1 MOS系统等效电路



其中：C_{ox}—MOS结构单位面积氧化层电容
C_s—半导体表面空间电荷区单位面积电容
C_{ss}—界面态电容

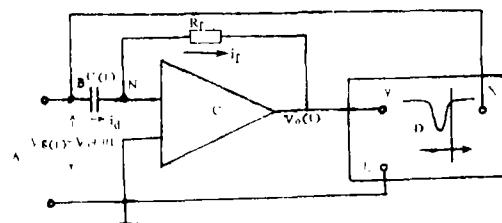


图3 测量线路

1985年5月18日收到

② 测量原理

准静态技术是在MOS结构上加一线性斜波扫描电压 $V_g(t) = V_1 + \alpha t$, 扫描速率 $\alpha = \frac{dV_g(t)}{dt}$ 为一常数。当它足够低时, 使系统处于准静态。我们测得系统的c-v特性即 $C_L(V_g) \sim V_g$ 称为准静态c-v特性。在图1中解出界面态电容 C_{ss} 与 C_{ox} 、 $C_L(V_g)$ 关系为:

$$C_{ss}(V_s) = \frac{C_{ox}C_L(V_g)}{C_{ox} - C_L(V_g)} - C_s(V_s) \quad (1)$$

图2中总电容用 $C_{理}(V_g)$ 表示, 解出 $C_s(V_s)$ 与 $C_{理}(V_g)$ 、 C_{ox} 关系为:

$$C_s(V_s) = \frac{C_{ox}C_{理}(V_g)}{C_{ox} - C_{理}(V_g)} \quad (2)$$

(2)式代入(1)式得到

$$C_{ss}(V_s) = \frac{C_{ox}C_L(V_g)}{C_{ox} - C_L(V_g)} - \frac{C_{ox}C_{理}(V_g)}{C_{ox} - C_{理}(V_g)} \quad (3)$$

由 C_{ss} 的定义则有:

$$dQ_{ss} = C_s(V_s)dV_s \quad (4)$$

其中 Q_{ss} —— 界面态电荷、 V_s —— 表面势。定义界面态密度 N_{ss} 表示能量为 E 的能级上、单位能量间隔的界面态数。则在能量 qdV_s 内界面态电荷量为

$$dQ_{ss} = q^2 N_{ss} dV_s \quad (5)$$

联立(4)、(5)两式, 再将(3)代入有

$$N_{ss}(E) = \frac{1}{q^2} \left[\frac{C_{ox}C_L(V_g)}{C_{ox} - C_L(V_g)} - \frac{C_{ox}C_{理}(V_g)}{C_{ox} - C_{理}(V_g)} \right] \quad (6)$$

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}\varepsilon_0}{d_0} \quad (7)$$

(7)代入(6)中

$$N_{ss}(E) = \frac{\varepsilon_{ox}\varepsilon_0}{d_0 q^2} \left[\frac{C_L(V_g)/C_{ox}}{1 - C_L(V_g)/C_{ox}} - \frac{C_{理}(V_g)/C_{ox}}{1 - C_{理}(V_g)/C_{ox}} \right] \quad (8)$$

(8)式给出由 V_s 所确定的能量 E 的能级上界面态密度与理想归一化MOS电容c-v特性及归一化准静态特性之间的关系。

③ 测试线路

测量线路如图3所示。其中A: 线性斜波电压发生器; B: 待测的MOS样品; C: ZC-36微电流计; D: X-Y记录仪。

④ 测量过程

用<100>晶向、 $\rho = 5 \sim 12 \Omega \cdot \text{cm}$ P-Si或 $\rho = 3 \sim 6 \Omega \cdot \text{cm}$ n-Si单晶抛光片, 制成MOS样

品。测量漏电流不大于 $10^{-13} A$ 。测出MOS结构归一化高频C—V曲线。例如对P—Si的MOS样品测出曲线如图4中曲线②。

以同一扫描速率给出MOS系统的归一化准静态曲线①。

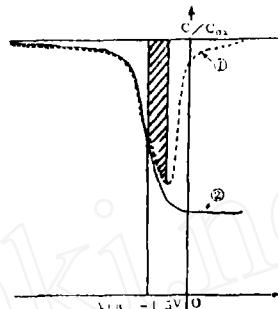


图4 高频与准静态C—V曲线(样品1)

3. 数据处理与测试举例

(一) 样品 I (P—Si, $\rho = 5 \sim 12 \Omega \cdot \text{cm}$, $N_A = 1.5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$, $d_0 = 1000 \text{\AA}$)

① V_{FB} 与 SiO_2 中净电荷数

由理论公式算出样品 I 归一化平带电容 $C_{FB}/C_{ox} = 0.74$, 由图4曲线②确定出平带电压 $V_{FB} = -1.5V$ 由公式算出 SiO_2 中净电荷数为

$$N_t \approx 2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$$

② 确立 $V_g \sim V_s$ 的关系

$$\text{准静态电容 } C_L(V_g) = C_{ox} \frac{dV_{ox}}{dV_g} \quad (9)$$

$$\text{而 } dV_g = dV_{ox} + dV_s \quad (10)$$

联立(9)、(10)可解出

$$V_s(V_a) = \int_{\text{积累}}^{V_a} \left(1 - \frac{C_L(V_s)}{C_{ox}}\right) dV_g + \Delta \quad (11)$$

由 $V_s = V_{FB}$, $V_s = 0$ 可定出 Δ

$$\Delta = - \int_{\text{积累}}^{V_{FB}} \left(1 - \frac{C_L(V_s)}{C_{ox}}\right) dV_g \quad (12)$$

(12)代入(11)中有

$$V_s(V_a) = \int_{\text{积累}}^{V_a} \left(1 - \frac{C_L(V_s)}{C_{ox}}\right) dV_g - \int_{\text{积累}}^{V_{FB}} \left(1 - \frac{C_L(V_s)}{C_{ox}}\right) dV_g \quad (13)$$

对应 $V_g = V_a$ 时, V_s 值为上面两积分之差在图4中是带阴影部分面积。解出的 $V_s \sim V_g$ 关系列于表 I 中。

③ 确立 $E \sim V_s$ 关系^[3]

界面态能级与半导体表面势关系为

$$E = -k_b T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) + qV_s \quad (14)$$

对每一个 V_s 由(14)可解出对应 E , 关系列于表 I 中。

表 I

V_g (V)	-3.5	-2	-1.2	-1.0	-0.5	-0.1	0.1	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0
V_s (mv)	-125	70	90	184	424	536	615	651	661	672	683	613
C_L/C_{ox}	0.98	0.91	0.6	0.52	0.43	0.75	0.87	0.94	0.96	0.91	0.98	0.99
$C_{理}/C_{ox}$	1.05	1.14	0.54	0.45	0.34	0.42	0.55	0.11	0.81	0.86	0.89	0.97
E (ev)	-0.42	-0.37	-0.2	-0.12	0.13	0.29	0.32	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39
$N_{ss}/\text{ev} \cdot \text{cm}^2$	9.1×10^2	2.5×10^{11}	4.4×10^{10}	3.6×10^{10}	3.1×10^{10}	4.9×10^{11}	7.2×10^{11}	1.1×10^{12}	2.3×10^{12}	5.5×10^{12}	1.1×10^{13}	2.3×10^{13}

④确立 $C_L(V_s)/C_{ox} \sim V_s$ 及 $C_{理}(V_s)/C_{ox} \sim V_s$ 关系

对每一 V_s 在图4的曲线①中找到对应的 $C_L(V_s)/C_{ox}$ 值，并也填入表 I。

由理论公式

$$C_s = \left(\frac{q^2 \epsilon_0 \epsilon_s}{2 K_b T} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{-\frac{qV_s}{K_b T} + n_{p0} \left(e^{-\frac{qV_s}{K_b T}} - 1 \right)}{\left(P_{p0} \left(e^{-\frac{qV_s}{K_b T}} + \frac{qV_s}{K_b T} - 1 \right) + n_{p0} \left(e^{-\frac{qV_s}{K_b T}} - \frac{qV_s}{K_b T} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

将每一 V_s 代入(15)求出 C_s 再代入(2)式求出

$$C_{理}(V_s)/C_{ox} = \frac{1}{1 + C_{ox}/C_s(V_s)} \quad (16)$$

对(15)、(16)两式采用《CASIO FX-702P》可编程序计算机算出其值，结果也列于表 I 中。

⑤确定 $N_{ss}(E) \sim V_s$ 关系

将求出的 $E \sim V_s$ 、 $C_L(V_s)/C_{ox} \sim V_s$ 、 $C_{理}(V_s)/C_{ox} \sim V_s$ 等关系代入(8)式中求出 $V_s \rightarrow E \rightarrow N_{ss}(E)$ 值，将 $N_{ss}(E)$ 也填入表 I 中。将 $E \sim N_{ss}$ 关系绘成曲线，见图5。

(二) 样品 II

(p-Si, $\rho = 3-6 \Omega \cdot \text{cm}$, $N_A = 1.5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$, $d_0 = 1500 \text{\AA}$)

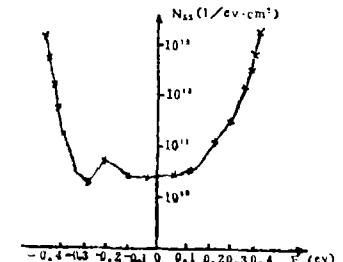


图5 界面态的能量分布(样品 I)

运用上述同样方法测出高频 c-v 及准静态 c-v。见图6中曲线 a 与 b。 $V_{FB} = -3.3 \text{V}$, $N_t = 4.7 \times 10^{11} / \text{cm}^2$ 。

将计算得到的 V_g 、 V_s 、 E 、 C_L/C_{ox} 、 $C_{理}/C_{ox}$ 、 N_{ss} 等关系列于表 II 中。

表Ⅰ

V_g (V)	-4.5	-4	-3.5	-3.4	-3.2	-2.8	-2.6	-2.4	-1.5	-1.0	1
V_s (mV)	-136	-98	-33	-17	18.5	103	150	193	396	489	682
C_L/C_{ox}	0.92	0.9	0.85	0.84	0.81	0.76	0.76	0.75	0.79	0.87	0.97
$C_{理}/C_{ox}$	1.015	1.024	1.17	1.23	0.77	0.63	0.69	0.54	0.44	0.42	0.92
E (eV)	-0.45	-0.38	-0.32	-0.3	-0.27	-0.18	-0.14	-0.1	0.11	0.2	0.39
$N_{ss} (10^{11} \text{ cm}^{-2})$	4.8×10^{12}	2.7×10^{12}	6×10^{11}	9.5×10^{11}	8.2×10^{10}	1.2×10^{11}	8.5×10^{10}	1.6×10^{11}	2.7×10^{11}	5.1×10^{11}	3.2×10^{12}

做出的 $N_{ss} \sim E$ 关系曲线见图7。

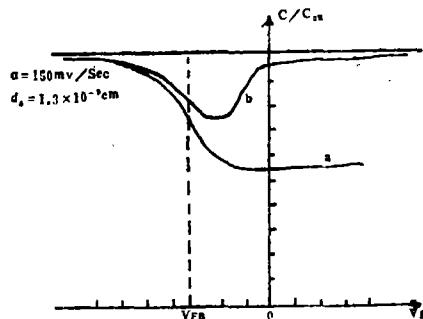


图6 高频与准静态C-v曲线(样品I)

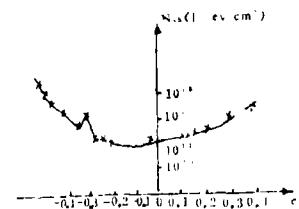


图7 界面态的能量分布(样品I)

(三) 样品III ($n\text{-Si}, \rho = 3 \sim 6 \Omega \cdot \text{cm}, N_D = 10^{15} / \text{cm}^3, d_0 = 1300 \text{\AA}$)

给出的高频 $c-v$ 和准静态 $c-v$ 曲线如图8所示。 $V_{FB} = -2 \text{ V}$ 、 $N_f = 1.69 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 。

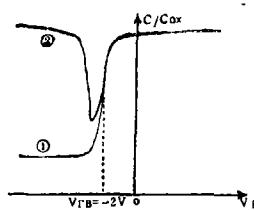


图8 高频与准静态C-v曲线(样品III)

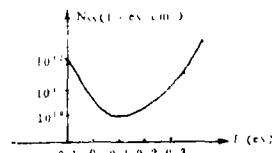


图9 界面态的能量分布(样品III)

$V_g \sim V_s$ 、 $E \sim N_{ss}$ 关系列于表Ⅲ中。将 $N_{ss} \sim E$ 关系绘成曲线如图9所示。

表Ⅲ

V_g (V)	-1.2	-1.3	-1.4	-2.5	-2.6	-2.7	-2.8	-2.9	-3.0	-3.1	-3.2	-3.3
V_s (mV)	98	95	91	-172	-212	-251	-289	-309	-327	-340	-350	-351
E (eV)	0.38	0.37	0.36	0.11	0.08	0.03	-0.005	-0.03	-0.047	-0.06	-0.07	-0.08
$N_{ss} (\text{cm}^{-2} \text{ eV}^{-1})$	3×10^{12}	1.5×10^{12}	5×10^{11}	1×10^{10}	4×10^{10}	8.6×10^{10}	2×10^{11}	4×10^{11}	7×10^{11}	1.1×10^{12}	1.7×10^{12}	2.7×10^{12}

4. 结果分析

(一) 测量结果说明以下几个问题

①在禁带中界面态是连续分布的。在禁带中央界面态密度最低(大约 $10^{10}/\text{cm}^2 \cdot \text{eV}$)、在导带底和价带顶附近界面态密度可高达 $10^{13}/\text{cm}^2 \cdot \text{eV}$ (有两个高峰)。

在 N_{ss} 较高的样品中在 V_{FB} 附近常出现一个小小的峰,认为是表面势起伏所导致^[4]。

②此技术可测量禁带中央大约 0.6eV 附近的范围内的界面态分布,精度可达 $10^{10}/\text{cm}^2 \cdot \text{eV}$ 。

③若仅需要知道耗尽区中界面态分布则 $C_L(V_s)/C_{ox}$ 一项可用 $C_H(V_s)/C_{ox} \sim V_s$ (高频c-v)值代替。绘出曲线基本一致。故准静态—高频c-v联合技术足以反映工艺条件对 N_{ss} 的影响。

④界面态的可测范围与界面态的密度有关。 N_{ss} 高的样品可测范围宽一些(如样品Ⅱ), N_{ss} 低的样品可测范围窄些(如样品Ⅰ)。

⑤ SiO_2 中净电荷密度 N_t 越高,则 N_{ss} 也越高。

(二) 测量中常出现的现象及注意事项

①准静态c-v与高频c-v在积累区不重合。

是因为准静态测量的输出幅度密切依赖于 V_{pp} 和T(电源电压和周期)。实验表明 V_{pp} 不变使 $T/2$ 由 $140\text{s} \sim 220\text{s}$ 之间改变时输出幅度改变如图10所示。若保持 $T/2 = 200\text{s}$ 不变,使 V_{pp} 由 $14\text{V} \sim 18\text{V}$ 改变则输出幅度由低变高,如图11所示。

②在强反型区出现 $C_L(V_s)/C_{ox}$ 曲线下沉,见图12①。

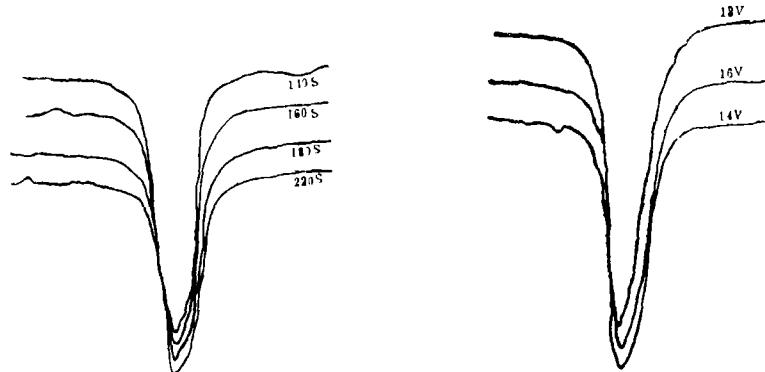


图10 改变 $T/2$ 对c-v曲线的影响

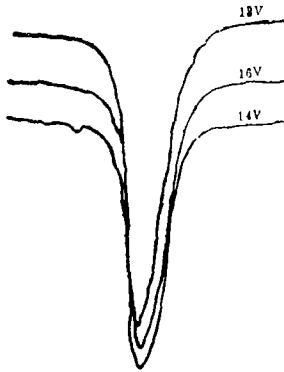


图11 改变 V_{pp} 对c-v的影响

认为是线性扫描电压 $V_0(t) = \alpha R_f C(t)$ 中 α 出现较大误差所致。在测量中注意使 α 保持为常数。一般选用XFD-8为信号源基本上可满足此测量需要。

③ $C_L(V_s)/C_{ox}$ 曲线整个发生倾斜,见图12②

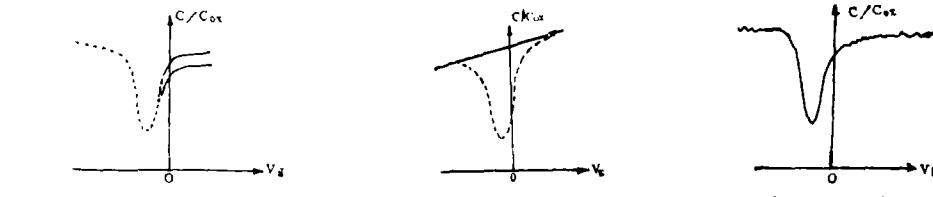


图12 不良曲线

分析认为由 SiO_2 漏电所致。

④测得的准静态曲线不光滑(有毛刺),如图12③。

原因可能有两方面(a). α 大小引起的噪声。一般将 α 提高可改善此情况。但 α 过大又会偏离准静态条件,所以一般选 $\alpha = 100 \text{ mV/sec} \sim 300 \text{ mV/sec}$ 。(b).外界电磁干扰可发生此情况,故测量中要很好屏蔽。

总之,准静态—高频c-v联合技术测量界面态的能量分布是一简单易行的技术,可广泛应用于生产实践,用来做工艺监控。

在实验中曾受到清华大学微电子所的同志的热情指导,在此表示谢意。

参考文献

- (1) M·Kubn·Solid State Eletronic vol.13 (1970).
- (2) 1424所报告《用准静态技术测量界面态能量分布》.
- (3) C. N. Bergl and IEE Trans Electron Devices-13 (1986).
- (4) G. Declerck, R. Van Overstraeten and G. Broux.

Measurement of Distribution of Interface States Using Quasi Static High Frequency C-V Joint Technique

Zhang Juhui, Wang Zhengrong, Shen Guifen

Department of physics, Liaoning University

ABSTRACT

The Principle of measurement of interface state distribution using quasi-static high frequency MOS c-v Joint technique is reviewed. The method of the measurement is given in detail. The distributions of interface density in gap as a function of energy are given for several typical MOS devices. measurement results have been analyzed at length.