

研究简报

用 MOS 恒定电荷法测定半导体少子的体产生寿命及表面产生速度

谭长华 许铭真

(北京大学计算机科学技术系)

1983年8月23日收到

在 MOS 由深耗尽态恢复到平衡反型态的过程中,如果 MOS 系统的总电荷保持恒定,则用半导体表面势(ψ_s)与 MOS 的瞬态微分电压($-\frac{dV}{dt}$)之间的渐近线性关系,可以同时确定少子的体产生寿命及表面产生速度。实验装置可以直接显示 ψ_s - $-\frac{dV}{dt}$ 曲线,省去了 Zerbst 方法的繁琐作图程序。

一、前言

自从 Zerbst^[1] 和 Heiman^[2] 提出“用 MOS 瞬态电容法测定少子的体产生寿命以及表面产生速度”以来,已有大量的工作对此方法进行了广泛深入的研究。J. G. Simmons^[3] 和 K. S. Rabbani^[4] 从理论和实验上论证了 Zerbst 方法给出的是准稳态寿命值。十多年来,为了提高测量精度,对产生宽度进行了修正^[5-7],对 Zerbst 曲线的非线性以及场增强少子产生效应进行了研究^[8,9]。为了提高测量效率,对 Zerbst 的数学处理方法进行了简化^[9,10,11]。然而,Zerbst 作图法对于批量样品的检验是不方便的。为此,国内外不少作者已进行了有意义的研究工作^[12-17]。

我们利用恒定电荷条件下的 MOS 瞬态电压特性测定少子的体产生寿命及表面产生速度,这是一种直接显示方法,省去了 Zerbst 作图法的繁琐程序。

二、理论分析

1. 深耗尽状态下的半导体表面

当阶跃脉冲电流施加于 MOS 电容器时,由于 MOS 结构是两端元件,同阶跃脉冲电压施加于 MOS 电容器一样,半导体表面处于非平衡深耗尽态。复合中心产生的电子-空穴对,在电场的作用下,少子移动到表面形成反型层,多子移动到体内,在空间电荷区边介处与电离杂质电荷中和,引起耗尽层变薄,从而引起 MOS 电压随时间变化。

如果脉冲电流过后, MOS 系统的电荷保持恒定,则 MOS 由非平衡深耗尽态恢复到平

衡反型态的过程中, MOS 的瞬态电压特性将提供少子体产生寿命及表面产生速度的信息。

2. MOS 瞬态电流方程

MOS 电容器的各种电荷之间的关系为:

$$Q_0 + Q_f + Q_i + Q_d = 0, \quad (1)$$

其中, Q_0 是栅电荷, 它是恒定的; Q_f 是氧化层中的各种固定电荷; Q_i 是半导体表面的反型电荷; Q_d 是半导体耗尽空间电荷。

(1) 式对时间微分, 得到

$$\frac{dQ_i}{dt} + \frac{dQ_d}{dt} = 0, \quad (2)$$

其中,

$$\frac{dQ_i}{dt} = A \cdot J_s, \quad \frac{dQ_d}{dt} = A \cdot J_d.$$

J_s 、 J_d 分别为少子产生电流密度和空间电荷区位移电流密度, A 为 MOS 栅面积。于是, MOS 的瞬态电流方程为

$$J_s + J_d = 0, \quad (3)$$

并且有^[3]

$$J_s = \frac{qn_i}{2\tau} (W - W_f) + \frac{qn_i}{2} s, \quad (4)$$

$$J_d = qN \frac{dW}{dt}. \quad (5)$$

其中, n_i 为本征载流子浓度; W 为空间电荷区宽度; W_f 为平衡反型空间电荷区宽度; N 为半导体掺杂浓度; τ 、 s 分别为体产生寿命和表面产生速度。

由 (3)、(4) 和 (5) 式得到

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{1}{T} (W - W_f^*), \quad (6)$$

其中,

$$W_f^* = W_f - \tau s, \quad (7)$$

$$T = \frac{2N\tau}{n_i}, \quad (8)$$

W_f^* 为有效平衡反型空间电荷区宽度, T 为热产生弛豫时间。

(6) 式的解为

$$W(t) = W_f^* + (W_0 - W_f^*) e^{-\frac{t}{T}}, \quad (9)$$

其中,

$$W_f^* = W(\infty), \quad W_0 = W(0).$$

3. MOS 瞬态电压方程

MOS 电容器的各电压之间的关系为:

$$V - V_{fb} = V_i + \phi_s, \quad (10)$$

其中, V 是 MOS 栅压; V_{fb} 是平带电压, 在介面态密度较低的情况下, 可以看作常量; V_i 是氧化层电压; ϕ_s 是半导体表面势。

在恒定电荷的条件下,

$$V_i = \frac{Q_0}{c_i}, \quad (11)$$

(10) 式对时间微分, 得到

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d\phi_s}{dt}. \quad (12)$$

通常, 半导体表面势可以用下式描述:

深耗尽态,

$$\phi_s = \frac{qN}{2\epsilon_0\epsilon_s} W^2, \quad (13)$$

平衡反型态,

$$\phi_{s0} = \frac{qN}{2\epsilon_0\epsilon_s} W_f^2, \quad (14)$$

由 (13)、(14) 和 (9) 式, 得到

$$\frac{\phi_s}{\phi_{s0}} = \left[\frac{W_f^*}{W_f} + \left(\frac{W_0}{W_f} - \frac{W_f^*}{W_f} \right) e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right]^2. \quad (15)$$

(15) 式对时间微分, 得到

$$-\frac{T}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\phi_s}{\phi_{s0}} \right) = \frac{\phi_s}{\phi_{s0}} - \frac{W_f^*}{W_f^2} W, \quad (16)$$

因为 $\frac{W_f^*}{W_f} < 1$, 故在深耗尽状态下,

$$\left(\frac{W}{W_f} \right)^2 \gg \frac{W_f^*}{W_f^2} W.$$

因此, 在 $\phi_s - \frac{d\phi_s}{dt}$ 图的初始段, 我们有

$$-\frac{T}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\phi_s}{\phi_{s0}} \right) \approx \frac{\phi_s}{\phi_{s0}}, \quad (17)$$

其斜率 $\alpha = -\frac{T}{2}$.

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 作为一级近似, 可以用求平均值的办法来估计 $\frac{W_f^*}{W_f^2} W$ 的贡献, 并得到 (16) 式的渐近式:

$$\frac{\phi_s}{\phi_{s0}} = -\frac{T}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\phi_s}{\phi_{s0}} \right) + \frac{W_0}{W_f} \left(1 - \frac{\tau_s}{W_f} \right). \quad (18)$$

由 (12) 和 (18) 式, 得到

$$\phi_s = -\frac{T}{2} \frac{dV}{dt} + \frac{W_0}{W_f} \left(1 - \frac{\tau_s}{W_f} \right) \phi_{s0}. \quad (19)$$

由 (8) 和 (19) 式, 知道 $\phi_s - \frac{dV}{dt}$ 图的直线部分的斜率与少子的体产生寿命相关, 其在纵

轴上的截距与表面产生速度相关。

三、实验和结果

1. 样品

N型硅单晶片, 电阻率为 $\sim 10\Omega\text{cm}$, $\langle 100 \rangle$ 取向; SiO_2 抛光; 1100°C 湿氧生长二氧化硅, 厚度约 $1000\text{\AA}$; 蒸发铝点, 直径为 1mm 。在 $\text{N}_2\text{-H}_2$ 中退火: 380°C , 30 分钟。界面态密度为 $\sim 2 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ 。

2. 测量装置

图 2 给出测量装置方框图。G 是阶跃电压发生器, C_0 是可调电容器, K 是高阻抗电

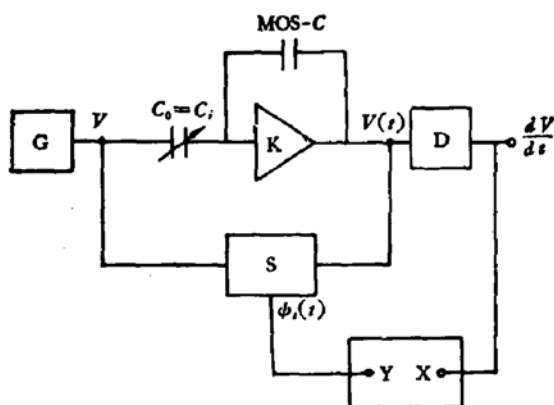


图 1 测量装置方框图

流运算放大器, D 是微分器, S 是加法器。 ϕ_s 和 $\frac{dV}{dt}$ 信号输入记录仪的 Y、X 轴。

3. 测量方法

G 给出阶跃脉冲电压, 电压波形如图 2(a) 所示。电压脉冲宽度 T_0 大于热产生弛豫时间 T 。

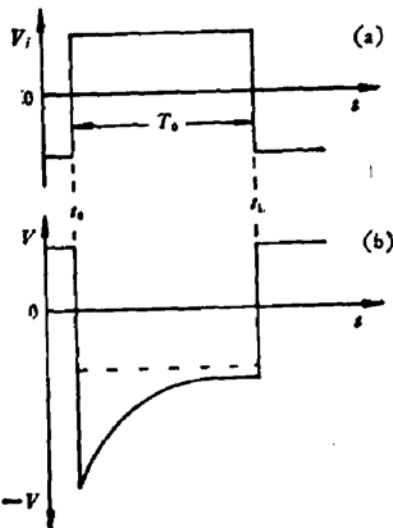


图 2 电压波形

$t = t_0$ 时, 阶跃脉冲电流加在 MOS-c 上, 其后
($t_0 < t < t_1$),

MOS 系统恒电荷, MOS 的栅电压波形如图 2(b) 所示。

使 $C_0 = C_i$, 加法器输出 ϕ_s 。将 ϕ_s 和 $\frac{dV}{dt}$ 信号输入记录仪(或超低频示波器)的 Y、X 轴, 得到

$$\phi_s - \frac{dV}{dt}$$

曲线, 其直线部分的斜率为 $\frac{T}{2}$, 在 Y 轴上的截距与 s 相关。

杂质浓度 N 可以用 C. C. V. T. 方法测量^[18]。

4. 实验结果

图 3 给出典型的归一化实验曲线 (c); 用 (16)、(19) 式计算的相应的理论曲线 (a)、

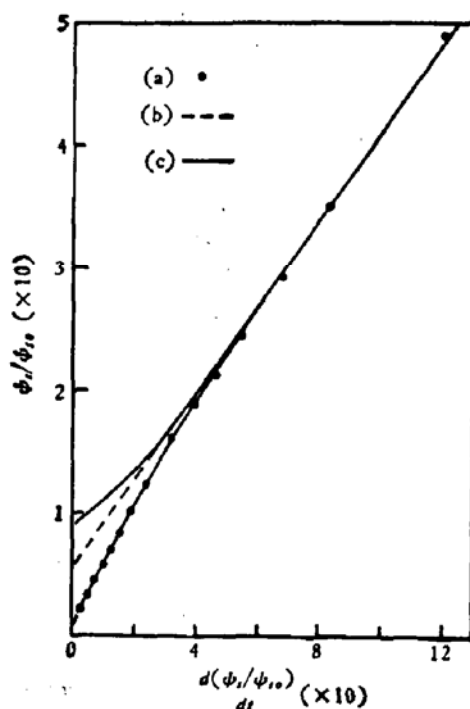


图 3 典型的实验曲线

- (b). 图 3 表明, 实验曲线的直线部分与理论计算值相符, 其直线的斜率为 $0.36s$. 在近表面处, 三条线是分离的. 实验曲线的直线部分在 Y 轴上的截距为 5.3 . C. C. V. T. 测得

$$N = 4.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}.$$

于是, 得到

$$\tau = 12 \mu s, s = 2.5 \text{cm/s}.$$

这一结果与 Zerbst 方法得到的结果是一致的。

四、结 论

恒定电荷法可以直接显示半导体表面势与 MOS 的微分电压之间的关系曲线, 由其直线部分的斜率可以确定少子的体产生寿命, 由其直线在 Y 轴上的截距可以估算表面产生速度. 此方法及其测量装置对于批量样品的检验以及研究半导体表面少子的体产生过程是一个有用的工具。

参 考 文 献

- [1] M. Zerbst, Z. Angew. Phys., 22, 30 (1966).

- [2] F. P. Heiman, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-14, 781 (1967).
- [3] J. G. Simmons and L. S. Wei, *Solid-State Electron.*, 19, 153 (1976).
- [4] K. S. Rabbani and D. R. Lamb, *Solid-State Electron.*, 26, 161 (1983).
- [5] R. F. Pierret, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-25, 1157 (1978).
- [6] K. S. Rabbani and D. R. Lamb, *Solid-State Electron.*, 21, 1171 (1978).
- [7] K. S. Rabbani and D. R. Lamb, *Solid-State Electron.*, 24, 661 (1981).
- [8] P. U. Calzolar, S. Graff and C. Morandi, *Solid-State Electron.*, 17, 1001 (1974).
- [9] C. Werner, A. Eder and H. Bernt, *Solid-State Electron.*, 24, 275 (1981).
- [10] K. H. Zaininger and F. P. Heiman, *Solid-State Tech.*, 13, 46 (1970).
- [11] 程文超, 黄振岗, 半导体学报, 1, 228 (1980).
- [12] 马鑫荣, 田立林, 李志坚, 半导体学报, 2, 298 (1981).
- [13] K. Board and J. G. Simmons, *Solid-State Electron.*, 20, 859 (1977).
- [14] P. Kuper and C. A. Grimbergen, *Solid-State Electron.*, 21, 549 (1978).
- [15] G. Kaplan, *Solid-State Electron.*, 23, 513 (1980).
- [16] 孙勤生, 半导体学报, 3, 45 (1982).
- [17] 张秀森, 半导体学报, 3, 103 (1982); 3, 192 (1982).
- [18] 谭长华, 许铭真, 北京大学学报(自然科学版), No. 1, 17 (1980).

Determination of Minority Carrier Bulk Generation Lifetime and Surface Generation Velocity by MOS Constant Charge Method

Tan Changhua and Xu Mingzhen

(Department of Computer Science and Technology, Peking University)

Abstract

It has been shown that, if the total charge of an MOS structure is constant in the process of transform from non-equilibrium deep depletion to equilibrium inversion state, the generation lifetime and surface generation velocity can be determined simultaneously through a linear evolute of the relationship between the surface potential, ψ_s , of semiconductor and the differentiation, dV/dt , of gate voltage with respect to time. Experimental set-up can directly show the ψ_s - dV/dt curves. The Zerbst's overelaborate graphical procedure is avoided.