

研究简报

由脉冲 MOS 结构的 $I-C$ 瞬态 曲线确定产生寿命的深度分布

张秀森

(杭州大学物理系)

1985年4月10日收到

本文分析了 MOS 结构的电流和电容对阶跃电压的瞬态响应过程。应用较精确的产生区模型,提出了由脉冲 MOS 结构的 $I-C$ 瞬态曲线确定产生寿命 τ_g 的深度分布的正确方法。

在实验上,本文提出了直接记录 $I-C$ 瞬态曲线的实验方法。本文指出,依据这样一条直接记录的 $I-C$ 瞬态曲线,就可以确定产生寿命 τ_g 的深度分布。

一、引言

许多文献已经报道了利用 MOS 结构对耗尽的阶跃电压或线性扫描电压的响应测定半导体表层空间电荷区中少数载流子体产生寿命 τ_g 和表面产生速度 S_g 的各种方法^[1-4]。但是这些方法实质上只是在假定表面产生速度可以忽略不计或为常数的条件下,测定表层空间电荷区内体产生寿命 τ_g 的平均值 $\bar{\tau}_g$ 。然而,在此表层空间电荷区内, τ_g 的深度分布一般是不均匀的。研究 τ_g 的深度分布的工作尚为数不多。

如所周知,在研究平均体产生寿命的测量中,需要给出产生区的宽度 W_g , Zerbst^[1]假设 $W_g = W - W_1$, 这里 W 为空间电荷区宽度, W_1 为 W 的稳态值。Pierret^[4] 则引入修正因子 ξ , 假设 $W_g = W - \xi W_1$ 。确实,对于平均体产生寿命的测量,只需给出这一宽度 W_g , 不必指明它在空间电荷区中的具体位置。但是,为了研究和确定 τ_g 的深度分布,就必须既给出宽度 W_g , 又指明它在空间电荷区中的位置。仔细的分析已经表明^[5,6], 产生区既不紧靠半导体中性区, 也不紧靠半导体表面, 现在一般认为 Rabbani 等^[6] 依据对准平衡能带图的分析给出的产生区宽度及其位置较为精确。根据文献[6], 产生区与半导体中性区之间相隔一段距离 $W_1/\sqrt{2}$ 。

本文根据 Rabbani 的产生区模型, 分析了 MOS 结构的电流和电容对阶跃电压的瞬态响应过程, 并据此提出了测定 τ_g 深度分布的正确方法。在实验上本文提出了直接记录 $I-C$ 瞬态曲线的实验方法。本文指出, 依据这样一条直接记录的 $I-C$ 瞬态曲线, 就可以确定产生寿命 τ_g 的深度分布。

二、理论分析

图 1 为一个 N 型衬底的 MOS 电容在深耗尽状态下的能带示意图。图中标明了产生区的宽度 W_s 及其位置, 体产生电流 I_{gb} 和表面产生电流 I_{gs} 。

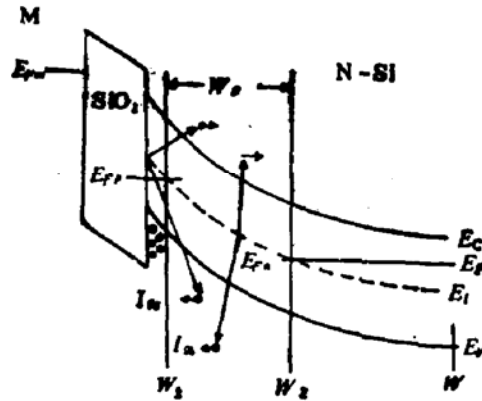


图 1 处于深耗尽状态的 MOS 结构能带示意图

由图 1 容易看出, 反型电荷 Q_i 和界面电荷 Q_{it} 的变化系来源于空间电荷区的体产生和表面产生, 因此有

$$I_g = I_{gb} + I_{gs} = \frac{d}{dt} (Q_i + Q_{it}). \quad (1)$$

忽略产生-复合中心上的电荷的变化, 电荷中性条件给出

$$\frac{dQ_m}{dt} + \frac{dQ_s}{dt} + \frac{dQ_i}{dt} + \frac{dQ_{it}}{dt} = 0, \quad (2)$$

式中 Q_m 和 Q_s 分别为金属栅上的电荷和空间电荷。于是我们有

$$I_g = I_{gb} + I_{gs} = - \frac{dQ_m}{dt} - \frac{dQ_s}{dt} = I - \frac{dQ_s}{dt}, \quad (3)$$

式中 I 即为从金属栅流出的瞬态电流。为了将(3)式右边全部用实验直接可测的量表示, 需要再次考察 MOS 结构的能带图 1。

如所周知, 加在 MOS 结构上的偏压 V_g 可分为三个部分: 表面势 ϕ_s , 空间电荷 Q_s 、自由电荷 Q_i 在二氧化硅中的电场造成的电势 V_{ox} , 平带电压 V_{FB} 。后者包括金属和半导体间的功函数差、二氧化硅中的电荷及界面电荷造成的电势差^[7], 即

$$V_g = \phi_s + V_{ox} + V_{FB}. \quad (4)$$

在 MOS 结构上加一耗尽的阶跃电压以后, V_g 保持不变。因而我们有

$$d\phi_s + dV_{ox} + dV_{FB} = 0, \quad (5)$$

其中

$$dV_{ox} = - \frac{1}{C_{ox}} d(Q_s + Q_i). \quad (6)$$

这里 C_{ox} 为氧化层电容。在假设二氧化硅中的电荷保持不变的条件下, 平带电压的改变

仅由界面电荷 Q_{it} 的变化引起,即

$$dV_{FB} = -\frac{1}{C_{ox}} dQ_{it} \quad (7)$$

由(5)–(7)式,并利用(2)式可得

$$\frac{d\phi_s}{dt} = -\frac{1}{C_{ox}} \frac{dQ_m}{dt} = \frac{1}{C_{ox}} \cdot I \quad (8)$$

在忽略通过反型区的微小的电势降落的条件下,(8)式右边可写为

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{d\phi_s}{dQ_d} \frac{dQ_d}{dt} = -\frac{1}{C_d} \cdot \frac{dQ_d}{dt} \quad (9)$$

式中 C_d 为空间电荷区电容。于是我们有

$$\frac{dQ_d}{dt} = -\frac{C_d}{C_{ox}} \cdot I \quad (10)$$

利用(10)式,可把(3)式写为

$$I_g = I \left(1 + \frac{C_d}{C_{ox}} \right) = \frac{IC_{ox}}{C_{ox} - C} \quad (11)$$

这里已利用了熟知的关系

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \quad (12)$$

另一方面,产生电流 I_g 可以用体产生寿命 τ_g 和表面产生速度 S_g 表为

$$I_g = I_{gb} + I_{gs} = A \int_{W_1}^{W_2} \frac{qn_i}{2\tau_g(x)} dx + Aqn_i S_g \quad (13)$$

式中 A 为 MOS 结构金属栅的面积, W_1 和 W_2 如图 1 所示为产生区 W_g 的两个边界,按照 Rabbani^[6],

$$W_1 = W - \sqrt{W^2 - W_g^2/2} \quad (14)$$

$$W_2 = W - W_g/\sqrt{2} \quad (15)$$

忽略电场增强产生效应,并且假定在瞬态过程中 S_g 为一常数,则(13)式和(11)式对时间的微商给出

$$\tau_g^{-1}(W_2) \frac{dW_2}{dt} - \tau_g^{-1}(W_1) \frac{dW_1}{dt} = \frac{2}{Aqn_i} \frac{d}{dt} \left(\frac{IC_{ox}}{C_{ox} - C} \right) \quad (16)$$

由(14)、(15)式容易证明 $\frac{dW_2}{dt} = \frac{dW}{dt}$, 并且在瞬态过程中有 $\frac{dW_1}{dt} \ll \frac{dW_2}{dt}$ (在文献[5]

中, Simmons 把 W_1 看成不变的, 因而有 $\frac{dW_1}{dt} = 0$), 因此(16)式可写为

$$\tau_g^{-1}(W_2) \frac{dW}{dt} = \frac{2}{Aqn_i} \frac{d}{dt} \left(\frac{IC_{ox}}{C_{ox} - C} \right) \quad (17)$$

利用(12)式以及空间电荷区宽度与势垒电容间的关系

$$C_d = \frac{A\epsilon_0\epsilon_{si}}{W} \quad (18)$$

可把(17)式最终写为

$$\tau_s^{-1}(W_2) = \frac{2C_{ox}C^2}{A^2q n_i \epsilon_0 \epsilon_{si} (C_{ox} - C)} \left(-\frac{dI}{dC} - \frac{I}{C_{ox} - C} \right), \quad (19)$$

或

$$\tau_s(W_2) = \frac{A^2q n_i \epsilon_0 \epsilon_{si} (C_{ox} - C)}{2C_{ox}C^2} \left(-\frac{dI}{dC} - \frac{I}{C_{ox} - C} \right)^{-1}. \quad (20)$$

式中 W_2 由(15)式给出, (15)式也可写成

$$W_2 = A \epsilon_0 \epsilon_{si} \left[C^{-1} - \frac{\sqrt{2}}{2} C_f^{-1} - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) C_{ox}^{-1} \right]. \quad (21)$$

C_f 为 C 的稳态值, C_f 与 W_f 的关系类似(18)和(12)式。从(20)和(21)式显然可见, 如果能在实验中测得 MOS 结构对阶跃电压响应的 $I-C$ 瞬态曲线, 则就可以由此确定产生寿命 τ_s 的深度分布。

三、实 验

直接测定 MOS 结构对阶跃电压响应的 $I-C$ 瞬态曲线的实验装置示意图如图 2 所示。为了同时测定高频电容和电流的瞬态响应, 在 CTG-1 高频 $C-V$ 特性测试仪的输入端串接了一个 LC 串联谐振回路, 其谐振频率调准在 CTG-1 的高频振荡频率 1MHz。因此它的接入不会影响 CTG-1 对高频电容瞬态的测量。同时由图 2 可见, 它的隔断直流作用又可以使 ZC-36 微电流计顺利完成电流瞬态的测量。

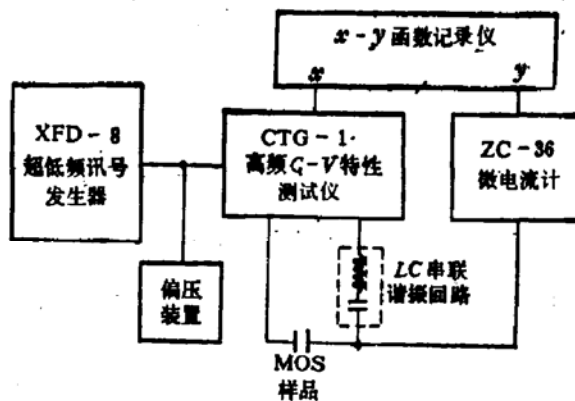


图 2 测试 $I-C$ 瞬态曲线实验装置示意图

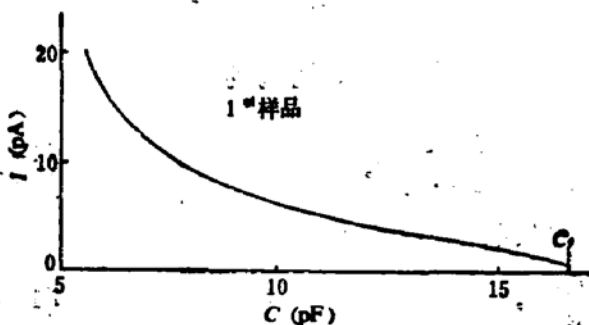


图 3 一个 MOS 结构的 $I-C$ 瞬态响应曲线

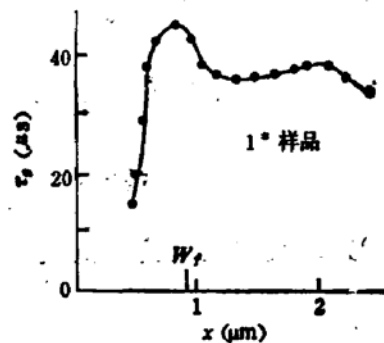


图 4 一个 MOS 结构的 τ_s 深度分布

图 3 为实验测得的一个 MOS 结构的 $I-C$ 瞬态响应曲线, 所用 MOS 样品的栅电极面积为 $2.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2$, 衬底为 $\langle 100 \rangle$ 晶向的 N 型硅, 电阻率约在 $8-12 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间, 抛光后的硅片经过表面剥层处理, 热生长的 SiO_2 层厚度约为 1500Å 左右。利用(20)和(21)式求得的这个 MOS 结构样品的产生寿命深度分布如图 4 所示。

四、讨论和结论

对于(20)和(21)式, 特别值得指出的一点是: 由 $I-C$ 瞬态曲线上 MOS 结构处于空间电荷区宽度为 W 状态时的数据 $\left[C(W), I, \frac{dI}{dC} \right]$ 求得的是深度为 $W_2 = W - W_1/\sqrt{2}$ 处的产生寿命 $\tau_g(W_2)$, 而非 $\tau_g(W)$ 。这是与[8]文不相同的。因此本方法能够给出比 W_1 更浅处的 τ_g (参见图4)。图 4 的实验结果表明, 本实验中的被测样品在表面附近存在产生寿命的一个高峰, 在那里产生中心的浓度特别低, 这一结果极其类似于陈开茅等^[9]所用样品的情况。

在本文的理论分析中已经考虑了界面态上电荷变化这一因素。这就是说, 界面态的充放电对确定 τ_g 的分布没有影响。事实上, 因为栅电极上的总电荷仅决定于表面势、界面态上的电荷和反型电荷的总和, 而与电荷在界面态和反型区的相对分布无关, 因此本文的分析即使对界面态密度相当高的样品也可适用。

对于工艺监控和质量分析来说, 产生寿命深度分布的测定无疑要比通常仅仅测定平均产生寿命的办法深入得多。因此本文方法可以作为一种较深入、全面的质量分析和评价手段在工艺监控和分析中应用。

参 考 文 献

- [1] M. Zerbst, *Z. angew. Phys.*, **22**, 30(1966).
- [2] P. Kuper and C. A. Grimbergen, *Solid-St. Electron.*, **21**, 549(1978).
- [3] K. Taniguchi, *Solid-St. Electron.*, **21**, 1057(1978).
- [4] R. F. Pierret, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **ED-25**, 1157(1978).
- [5] J. G. Simmons and L. S. Wei, *Solid-St. Electron.*, **19**, 153(1976).
- [6] K. S. Rabbani and D. R. Lams, *Solid-St. Electron.*, **21**, 1171(1978).
- [7] A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, 1967.
- [8] 孙勤生, *半导体学报*, **3**, 45(1982).
- [9] 陈开茅、陈凯来、王安安, *半导体学报*, **5**, 498(1984).

Determination of the Generation Lifetime Profile from *I-C* Transient Curve of Pulsed MOS Structure

Zhang Xiumiao

(Department of Physics, Hangzhou University)

Abstract

The current and capacitance transient state processes of MOS structure to respond to a step voltage have been analyzed. Using relatively exact model of generation region, a correct method to determine the generation lifetime profile from *I-C* transient curve of pulsed MOS structure has been presented. Experimentally, an experimental method to record directly the *I-C* transient curve has been also presented. It has been shown that the generation lifetime profile can be determined from such an *I-C* transient curve recorded directly.