

# 用 MOS 电容瞬态电流-电容法直接测定少数载流子的体产生寿命分布和表面产生速度

孙 勤 生

(南京大学物理系)

1980年9月18日收到

## 提 要

本文提出了一种灵敏方便的 MOS 电容瞬态电流-电容法, 即  $I-C$  法, 应用它可直接从 MOS 电容相关的瞬态电流  $I-t$  和瞬态电容  $C-t$  曲线方便地测定出耗尽层中少数载流子的体产生寿命分布  $\tau_g(x_d)$  和表面产生速度  $S_g$  等参数。文中导出和分析了 MOS 结构较普遍的瞬态电荷、电流和电容方程, 以及界面态密度  $N_{ss}(E_s)$ 、寿命  $\tau_g(x_s)$  和  $\bar{\tau}_g(x_d)$ 、 $S_g$  的计算公式。从  $\tau_g$  分布的测定结果可见, MOS 结构中在约  $3\mu\text{m}$  宽的界面层内, 从体内向界面  $\tau_g$  明显下降。

## 一、引言

少数载流子的体产生寿命  $\tau_g$  和表面产生速度  $S_g$  是反映界面空间电荷层体内和界面的产生-复合中心对器件特性影响的参数, 它们是与器件的工艺情况、二次缺陷、衬底材料等因素密切相关的灵敏参数, 因此  $\tau_g$  和  $S_g$  的测定可作为半导体材料、器件质量分析和工艺监控的一种有效手段。

关于 MOS 结构中  $\tau_g$  和  $S_g$  的测量方法, 已有 Zerbst<sup>[1]</sup> 和 Heiman<sup>[2]</sup> 提出的瞬态电容  $C-t$  法 Wolf Zechnell<sup>[3]</sup>, 和 Viswanathan<sup>[4]</sup> 提出的瞬态电荷  $Q-t$  法, Simmons<sup>[5]</sup> 和 Taniuchi<sup>[6]</sup> 提出的三角波扫描非平衡  $C-V$  法。但文献中报道的这些方法存在着以下缺点: 需测定杂质浓度  $N_D$ , 对杂质分布不均匀的样品测试和计算均较麻烦, 误差较大,  $\tau_g$  和  $S_g$  不易区分, 而且这些方法只适于测  $\tau_g$  的平均值  $\bar{\tau}_g$ , 而不适于测  $\tau_g$  的分布  $\tau_g(x_d)$ 。然而, MOS 结构中  $\tau_g$  的纵向分布一般是不均匀的, 特别是在界面层内。Roberts<sup>[7]</sup> 提出的用 MOS 栅控二极管的反向漏电流测  $\tau_g$  和  $S_g$  的方法, 可用来测定接近界面处的  $\tau_g$ , 文中采用的由所测的  $\bar{\tau}_g$  分布间接求  $\tau_g$  分布的方法, 存在着计算麻烦误差较大的缺点。

本文提出的 MOS 电容瞬态电流-电容法, 较好地解决了 MOS 结构中  $\tau_g$  和  $S_g$  的测量问题, 能直接根据记录仪上所记录的 MOS 电容相关的  $I-t$  和  $C-t$  曲线, 方便地测定  $S_g$ , 和在一个大的  $x_d$  范围内测定  $\tau_g(x_d)$  和  $\bar{\tau}_g(x_d)$ , 而不需知道杂质浓度。本方法还可应用来测定界面态密度分布  $N_{ss}(E_s)$  等参数。由于本方法测试和计算方便, 灵敏度较高、可测

参数较多,而且仪器可综合使用,因此很适合用在半导体器件,特别是MOS和CCD器件工艺线中作为质量分析和工艺监控的一种有效手段。

## 二、原理和方法

### 1. MOS 瞬态过程

如图1所示,当N型硅MOS电容器金属栅上的外偏压 $V_g$ 由正偏或零偏阶跃到足够高的负偏时,界面空间电荷层将由电子积累阶跃为耗尽。在阶跃后的瞬态过程中,阶跃前被界面态 $N_{ss}(E_i)$ 和深能级态 $N_t(E_i, x)$ 俘获,而阶跃后处于费米能级 $E_F$ 上部的界面态和深能级态上的电子将向导带 $E_c$ 跃迁,构成了界面态和深能级态电子发射流 $I_{se}$ 和 $I_{te}$ ,而本征费米能级 $E_i$ 附近的界面态 $N_{ss}(E_i)$ 和深能级态 $N_t(E_i, x)$ 将起产生-复合中心作用,在耗尽的空间电荷层和界面产生电子-空穴对,构成了体内和表面产生电流 $I_{bg}$ 和 $I_{sg}$ 。 $I_{se}$ 和 $I_{te}$ 使界面态和深能级态上的正电荷 $Q_s$ 和 $Q_t$ 增加,而 $I_{bg}$ 和 $I_{sg}$ 使少数载流子(空穴)电荷 $Q_p$ 增加。由于这四股瞬态电流的作用,瞬态过程中MOS电容的电荷量 $Q_m$ 和电容量 $C$ 增加,而空间电荷层宽度 $x_d$ 和施主杂质电荷 $Q_D$ ,以及表面势 $V_s$ 和瞬态电流 $I$ 则相应减小。瞬态过程终止时,表面出现强反型层,这时 $x_d = x_{fd}$ 、 $C = C_f$ 、产生与复合完全平衡 $I = 0$ 。

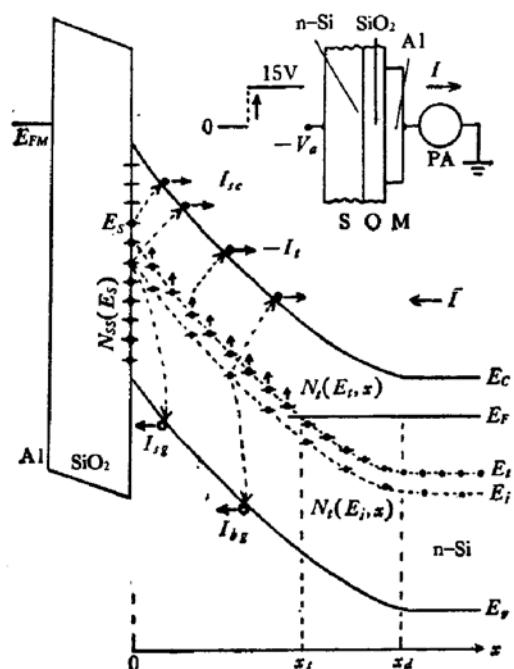


图1 瞬态过程中MOS结构内电子发射及电子-空穴对的产生情况

根据电中性条件,MOS电容的电荷方程为

$$\frac{dQ_m}{dt} + \frac{dQ_s}{dt} + \frac{dQ_t}{dt} + \frac{dQ_D}{dt} + \frac{dQ_p}{dt} = 0, \quad (1.1)$$

式中 $Q_m$ 为电容器金属栅上的电荷量, $t$ 为时间,由于

$$\frac{dQ_s}{dt} = I_{se}, \quad \frac{dQ_t}{dt} = I_{te}, \quad \frac{dQ_p}{dt} = I_{bg} + I_{sg} \quad (1.2)$$

式(1.1)可写成为

$$-\left(\frac{dQ_m}{dt} + \frac{dQ_D}{dt}\right) = I_{se} + I_{te} + I_{bg} + I_{sg}. \quad (1.3)$$

MOS电容中的电荷量

$$dQ_m = C_{ox} \cdot dV_{ox}, \quad (2.1)$$

$$dQ_D = C_d \cdot dV_s = qN_D(x_d) \cdot A_m \cdot dx_d, \quad (2.2)$$

式中 $V_{ox}$ 为氧化层上的电压降, $q$ 为电子的电荷值, $N_D(x_d)$ 为施主杂质浓度分布, $A_m$ 为MOS电容的面积。在高频情况下,MOS电容量 $C$ 与氧化层和空间电荷层的电容量 $C_{ox}$ 和 $C_d$ 的关系为

$$C^{-1} = C_{ox}^{-1} + C_s^{-1}, \quad (3)$$

而空间电荷层宽度与电容的关系为

$$x_d = A_m \varepsilon_s \cdot [C^{-1} - C_{ox}^{-1}], \quad (4.1)$$

$$x_{fd} = A_m \varepsilon_s \cdot [C_f^{-1} - C_{ox}^{-1}], \quad (4.2)$$

式中  $\varepsilon_s$  为硅的介电常数。

MOS 电容的电压方程为

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{dV_{ox}}{dt} + \frac{dV_s}{dt}. \quad (5.1)$$

对于阶跃后外偏压  $V_s$  保持不变的瞬态过程

$$dV_{ox} + dV_s = 0, \quad (5.2)$$

所以,由式(2)、(3)和(5.2)可得

$$dQ_D = \frac{C}{C_{ox} - C} \cdot dQ_m, \quad (6)$$

将其代入式(1.3)可得 MOS 瞬态电荷方程

$$-\frac{C_{ox}}{C_{ox} - C} \cdot \frac{dQ_m}{dt} = I_{se} + I_{te} + I_{bg} + I_{sg}. \quad (7)$$

由于

$$I = -\frac{dQ_m}{dt}, \quad (8)$$

于是由式(7)可得 MOS 瞬态电流方程

$$\frac{C_{ox}}{C_{ox} - C} \cdot I = I_{se} + I_{te} + I_{bg} + I_{sg}. \quad (9)$$

而根据式(2.2)、(4.1)和(6),由式(7)可得 MCS 瞬态电容方程

$$q A_m^2 \varepsilon_s N_D(x_d) C_{ox} C^{-3} \cdot \frac{dC}{dt} = I_{se} + I_{te} + I_{bg} + I_{sg}. \quad (10)$$

但要应用这些方程,还需知道方程中四股瞬态电流分量的定量关系。

界面态电子发射流

$$I_{se} = q \cdot e_{ns}(E_s) \cdot n_s(E_s) \cdot A_m, \quad (11.1)$$

表面能级  $E_s$  上电子的跃迁几率

$$e_{ns}(E_s) = \sigma_{ns} \cdot v_{th} \cdot N_e \cdot \exp \left[ -\frac{E_c - E_s}{kT} \right], \quad (11.2)$$

式中  $\sigma_{ns}$  为俘获截面,  $v_{th}$  为电子的热运动速度,  $N_e$  为导带的态密度,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T(K)$  为温度。由于瞬态过程中, 界面态上的电子随能级  $E_s$  自上而下顺序向导带跃迁, 因此不同能级上电子的跃迁几率  $e_{ns}(E_s)$  与瞬态过程的时间  $t$  (瞬态开始点  $t = 0$ ) 之间存在着

$$e_{ns}(E_s) = t^{-1} \quad (11.3)$$

的关系<sup>[8]</sup>, 又因能级  $E_s$  附近, 能量在  $\pm \frac{1}{2} kT$  范围内的界面态电子的平均跃迁几率  $\cong e_{ns}(E_s)$ , 也即式(11.1)中具有相同跃迁几率的界面态电子浓度为

$$n_s(E_s) = N_{ss}(E_s) \cdot kT, \quad (11.4)$$

所以式(11.1)可写成为

$$I_{se} = q \cdot N_{ss}(E_s) \cdot kT \cdot A_m \cdot t^{-1}, \quad (11.5)$$

式中  $N_{ss}(E_s)$  为界面态密度分布 ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ ).

深能级的电子发射流

$$I_{te} = qA_m \sum_{E_t} e_{nt}(E_t) \cdot \int_0^{x_t} n_t(E_t, x, t) \cdot dx, \quad (12.1)$$

深能级  $E_t$  上电子的跃迁几率

$$e_{nt}(E_t) = \sigma_{nt} \cdot v_{th} \cdot N_c \cdot \exp \left[ -\frac{E_e - E_t}{kT} \right], \quad (12.2)$$

式中  $\sigma_{nt}$  为俘获截面, 瞬态过程中, 能级  $E_t$  上的电子浓度

$$n_t(E_t, x, t) = N_t(E_t, x) \cdot \exp[-e_{nt} \cdot t], \quad (12.3)$$

式中  $N_t(E_t, x)$  为深能级  $E_t$  的态密度分布, 因耗尽层中  $E_t$  高于  $E_F$  的空间电荷层宽度

$$x_t = x_d - \left[ \frac{2\varepsilon_s(E_t - E_F)}{q^2 \cdot N_D(x_d)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (12.4)$$

对耗尽层较宽的情况,  $x_t \approx x_d$ , 所以

$$I_{te} = qA_m \sum_{E_t} e_{nt} \cdot \exp[-e_{nt} \cdot t] \cdot \int_0^{x_d} N_t dx. \quad (12.5)$$

表面产生电流

$$I_{tg} = q n_t S_g A_m, \quad (13.1)$$

式中  $n_t$  为本征载流子浓度. 表面耗尽时  $S_g$  与表面产生-复合中心密度  $N_{st}$  ( $\text{cm}^{-2}$ ) 的关系为

$$S_g = \frac{1}{2} \sigma_{nt}(E_t) \cdot v_{th} \cdot N_{st}, \quad (13.2)$$

式中  $\sigma_{nt}(E_t)$  为俘获截面.  $N_{st}$  主要由能级  $E_t$  附近  $\pi kT$  能量范围内的界面态提供<sup>[9]</sup>, 所以

$$N_{st} = N_{ss}(E_t) \cdot \pi kT. \quad (13.3)$$

耗尽层的体产生电流

$$I_{bg} = qA_m \cdot \int_{\xi x_{fd}}^{x_d} \frac{n_t}{2\tau_g(x)} \cdot dx, \quad (14.1)$$

式中  $n_t \cdot [2\tau_g(x)]^{-1}$  为耗尽层体内电子-空穴对的产生率, 而体产生寿命

$$\tau_g(x) = \frac{1}{2} [\sigma_b \cdot v_{th} \cdot N_t(E_t, x)]^{-1}, \quad (14.2)$$

$E_t$  附近的深能级产生-复合中心  $N_t(E_t, x)$  是由杂质 Au、Cu、和晶格缺陷等提供, 它们的密度分布一般不均匀, 特别是在界面层, 这使  $\tau_g(x_d)$  的分布也不均匀. 式中俘获截面  $\sigma_b$  取决于产生-复合中心对电子和空穴的俘获截面  $\sigma_{nb}$  和  $\sigma_{pb}$  中小的一个, 对 N 型硅中的 Au,  $\sigma_b = \sigma_{nb}$ . 式(14.1)中的积分下限  $\xi x_{fd}$ , 为瞬态过程中在界面处形成的产生-复合平衡区宽度.  $\xi$  是一修正因子, 瞬态过程开始时  $\xi = 0$ , 而终止时  $\xi = 1$ .

将以上所得的式(11.5)、(12.5)、(13.1)和(14.1), 代入式(7)、(9)和(10), 可得

较普遍的 MOS 瞬态电荷、电流、电容方程, 其中电流方程为

$$\frac{C_{ox}}{C_{ox} - C} \cdot I = qA_m \cdot \left[ N_{ss}(E_s) \cdot kTt^{-1} + \sum_{E_t} e_{nt} \cdot e^{-e_{nt}t} \cdot \int_0^{x_d} N_t dx \right. \\ \left. + \frac{1}{2} n_i \int_{\xi x_{fd}}^{x_d} \tau_g^{-1}(x) + n_i S_g \right] \quad (15)$$

从上式可见 MOS 瞬态方程包含了界面态、深能级态、体产生寿命和表面产生速度等重要的半导体物理量。由于多个因素的作用, 瞬态过程也是较复杂的, 但根据  $I_{se}$ 、 $I_{te}$ 、 $I_{bg}$  和  $I_{sg}$  的特点, 在一定的测试和样品条件下, 我们可区分这些因素的作用, 使方程(15)等简化以及变换为适于测  $N_{ss}(E_s)$ 、 $\tau_g$  和  $S_g$  等参数的关系式。

例如, 为测定  $N_{ss}(E_s)$ , 我们应降低以至消除  $I_{se}$ 、 $I_{bg}$  和  $I_{sg}$  对测试的影响。从方程(15)可见, 这可通过降低  $n_i$  和  $x_d$  来实现, 因此可采取低温、低阶跃偏压的测试条件, 在这条件下方程(15)可简化为

$$\frac{C_{ox}}{C_{ox} - C} \cdot I = qN_{ss}(E_s) \cdot A_m \cdot kTt^{-1}. \quad (16)$$

根据此式, 以及根据由式(11.2)和(11.3)所给出的关系

$$E_s = E_c - kT \cdot \ln(\sigma_{ns} \cdot v_{th} \cdot N_c \cdot t), \quad (17)$$

则由 MOS 瞬态  $I-t$  曲线即可测定  $N_{ss}(E_s)$  分布。

消除  $I_{se}$ 、 $I_{bg}$  和  $I_{sg}$  最有效的办法, 是在阶跃后的瞬态过程中保持  $x_d \cong 0$ , 即采取使  $C \cong C_{ox}$  恒定的测试条件。在这条件下  $dx_d$  和  $dQ_D = 0$ , 而偏压  $V_a$  可以变化, 所以  $dQ_m = C \cdot dV_a \cong C_{ox} \cdot dV_a$ , 从电荷方程(1.3)可得简化关系

$$-\frac{dQ_m}{dt} = I_{se}, \quad (18.1)$$

即  $-C_{ox} \cdot \frac{dV_a}{dt} = qA_m N_{ss}(E_s) \cdot kTt^{-1}. \quad (18.2)$

在取样时间  $t_1$  和  $t_2$  范围内对上式积分, 可得

$$\Delta V_a = V_a(t_2) - V_a(t_1) = qA_m N_{ss}(E_s) \cdot kT C_{ox}^{-1} \ln \frac{t_2}{t_1}, \quad (18.3)$$

而由式(17)可得  $E_s = E_c - kT \cdot \ln[\sigma_{ns} v_{th} N_c \bar{t}_{12}]$ ,  $(18.4)$

式中  $\bar{t}_{12} = \frac{1}{2}[t_1 + t_2]$  为平均取样时间, 如取  $t_2 = 2t_1$ , 则  $\bar{t}_{12} = 1.5t_1$ 。因此根据式(18.3)和(18.4), 由恒定电容  $C = C_{ox}$  条件下所测得的  $\Delta V_a-T(K)$  实验曲线, 即可测定出  $N_{ss}(E_s - E_c)$  分布曲线。这即为  $CC$ -DLTS 技术<sup>[10]</sup>。

### 3. $\tau_g(x_d)$ 、 $S_g$ 和 $\bar{\tau}_g(x_d)$ 的计算公式和测定方法

关于  $\tau_g$  和  $S_g$  的测定, 从式(7)、(9)和(10)的比较可见, 瞬态电流方程比电荷方程低一阶微分, 而比电容方程低一阶微分还少一个参数  $N_D(x_d)$ , 因此采用  $I-t$  法将比  $C-t$  法和  $Q-t$  法简便, 特别是对于杂质浓度  $N_D$  非均匀的样品。从式(15)可见, 要测定  $\tau_g$  和  $S_g$  应消除  $I_{se}$  和  $I_{te}$  的影响。由于  $I_{se}$  和  $I_{te}$  是随时间较快衰减的二个量, 在室温,  $t > 0.1$  秒后的瞬态过程中, 它们基本上可略去, 所以在室温,  $t \gg 0.1$  秒的条件下, 式(15)可简化为

$$\frac{C_{ox}}{C_{ox} - C} \cdot I = qn_i A_m \cdot \left[ \frac{1}{2} \int_{\xi x_{fd}}^{x_d} \tau_g^{-1}(x) dx + S_g \right]. \quad (19)$$

对于低寿命样品,由于产生过程的弛豫时间短,其时间  $\gg 0.1$  秒的条件不易满足,即上式不能成立,为此可采取低温测试。由于  $n_i$  随温度指数下降,产生过程的弛豫时间将可  $\gg I_{se}$  和  $I_{te}$  的弛豫时间。

文献 [1—6] 等作者在他们用以测  $\tau_g$  和  $S_g$  的关系式中,取

$$I_{bg} = (2\tau_g)^{-1} \cdot qn_i A_m (x_d - x_{fd}), \quad (20.1)$$

或

$$I_{bg} = (2\tau_g)^{-1} \cdot qn_i A_m^2 \cdot \varepsilon_s \cdot (C^{-1} - C_f^{-1}), \quad (20.2)$$

从式 (19) 可见,此式中的  $\tau_g$  是平均值  $\bar{\tau}_g$ ,而且定义  $x_d - x_{fd}$  为体产生区宽度是一较大的近似。因此 Robert<sup>[11]</sup> 在其  $C-t$  法测  $\tau_g$  的关系式中,考虑到上式的近似性,引入修正因子  $\xi$ ,取

$$I_{bg} = (2\tau_g)^{-1} \cdot qn_i A_m \cdot (x_d - \xi x_{fd}), \quad (20.3)$$

这使  $\tau_g$  平均值的可测准范围有了扩大,但也增加了计算的麻烦。

本文通过对瞬态电流方程 (19) 求微分,得到了能直接根据 MOS 电容相关的  $I-t$  和  $C-t$  曲线测定  $\tau_g(x_d)$  分布的计算公式。因为在  $C < C_f$  的瞬态过程中,  $S_g$  基本不变,  $dI_{sg}/dt = 0$ ,而且  $dx_d/dt \gg d\xi x_{fd}/dt$ ,所以对式 (19) 微分可得

$$d \left( \frac{C_{ox}}{C_{ox} - C} \cdot I \right) = \frac{1}{2} qn_i A_m \tau_g^{-1}(x_d) \cdot dx_d,$$

利用式 (4.1) 中  $x_d$  与  $C$  的关系,由上式可得

$$\tau_g(x_d) = \frac{1}{2} qn_i \varepsilon_s A_m^2 \cdot C_{ox}^{-1} C^{-1} [C_{ox} - C] \cdot \left[ \left| \frac{dI}{dC} \right| - \frac{I}{C_{ox} - C} \right]^{-1}. \quad (21)$$

由于表面产生电流的作用,  $I-t$  的弛豫时间  $t_l$  将比  $C-t$  的弛豫时间  $t_C$  长一些。当瞬态快终止  $t = t_C$ ,即  $C$  增加到  $C \cong C_f$  时,体产生区宽度  $x_d - \xi x_{fd}$  降为零,相应  $I_{bg} = 0$ ,因此这时的瞬态电流  $I = I_f$  仅由  $I_{sg}$  提供,于是从式 (19) 可得

$$S_g = C_{ox} I_f \cdot [qn_i A_m \cdot (C_{ox} - C_f)]^{-1}. \quad (22)$$

我们取式 (19) 中的  $\tau_g$  为平均值,并把式 (4.1) 和上式代入其中,于是可得

$$\bar{\tau}_g(x_d) = \frac{1}{2} qn_i \varepsilon_s A_m^2 \cdot \left[ \frac{C_{ox} I}{C_{ox} - C} - \frac{C_{ox} I_f}{C_{ox} - C_f} \right] \cdot \left[ \frac{1}{C} - \frac{\xi}{C_f} - \frac{1 - \xi}{C_{ox}} \right]. \quad (23)$$

为计算方便起见,在瞬态过程的前半部可取式中的  $\xi = 0$ ,而后半部取  $\xi = 1$ 。

根据以上三式以及式 (4.1),由记录仪上所得到的,如图 3 所示的 MOS 电容相关的  $I-t$  和  $C-t$  曲线,就可直接测定  $\tau_g$  和  $\bar{\tau}_g$  的分布,以及  $S_g$ ,而不需要知道杂质浓度。

对于  $\tau_g$  低和  $S_g$  大的样品,如前所述可采取低温测试,在低温下由于  $n_i$  的显著减小,瞬态电流  $I$  将相应减小,而弛豫时间  $t_l$ 、 $t_C$  以及  $t_l-t_C$  都将相应增加,这将使  $\tau_g$  和  $S_g$  的可测范围大大扩大。

式 (21) 中,不同时刻  $t$  的  $dI/dC$ ,可以从  $I-t$  和  $C-t$  曲线得到,如图 3 中所示,也可通过直接记录的  $dI/dt-t$  和  $dC/dt-t$  曲线而得到,还可由,如图 6 所示的双阶跃脉冲  $I-t$  和  $C-t$  曲线而得到。采用偏压  $V_a$  分别为  $V_{a1}$  和  $V_{a2} = V_{a1} - \Delta V_a$ ,  $\Delta V_a \ll V_{a1}$  的双阶跃脉冲,可消除  $I_{se}$  对  $\tau_g$  测试的影响。采用双阶跃脉冲时式 (21) 中的

$$\frac{dI}{dC} = \frac{I_1 - I_2}{C_2 - C_1} \Big|_t = \frac{\Delta I}{\Delta C} \Big|_t, \quad C = \frac{1}{2} (C_1 + C_2), \quad I = \frac{1}{2} (I_1 + I_2),$$

式中  $I_1$  和  $C_1$  对应  $V_{a1}$ ,  $I_2$  和  $C_2$  对应  $V_{a2}$ .

### 三、测量装置和测量结果

本文提出的 MOS 电容瞬态电流-电容法的测量装置, 如图 2 所示。此装置包括 ZC36  $10^{-14}$  A 微电流仪、CTG-1 高频  $C-V$  仪、XFD-8 A 超低频信号发生器、阶跃脉冲形成器、JD3X-Y 记录仪等。此装置可测试记录 MOS 电容的瞬态  $I-t$ 、 $C-t$  和  $Q-t$  曲线, 如图 3、6 和 10 所示, 并可应用来进行准静态、高频  $C-V$ 、三角波扫描非平衡  $C-V$ 、热激电流等测试。瞬态测量时, 样品要置于不漏光的屏蔽暗盒内。样品的漏电流必须  $\ll$  瞬态电流, 本方法很容易避免由此产生的测量误差。相关的  $I-t$  和  $C-t$  曲线在完全相同的条件下先后测得。 $I-t$  和  $C-t$  测试之间的变换可自动进行, 也可采用手动。为了提高  $I-t$  测试时 MOS 电容的阶跃瞬变速度, 采用了图 2 中继电器 JRX-13F。

我们对 MOS 电路工艺线所提供的 N 型硅 MOS 电容样品进行了测试。样品的面积  $A_m = 0.7 \text{ mm}^2$ 、氧化层厚度约  $1500 \text{ \AA}$ 、电阻率约  $8 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 。文中给出的曲线和数据是在室温下测得的。低温下也进行过测试。

图 3 为样品 1 在  $V_a$  由 0 阶跃到  $-15 \text{ V}$  后所测得的相关  $I-t$  和  $C-t$  曲线。将此组曲线不同时刻  $t$  所对应的  $I$ 、 $C$  和  $dI/dC$  值代入式(21)和(4.1)计算, 所得的  $\tau_g \sim x_d$  分布如图 4 所示。从图 3 可见, 弛豫时间  $t_c = 36 \text{ s}$ 、 $t_l = 43 \text{ s}$ , 对应  $t_c$  的  $I_f = 7 \times 10^{-12} \text{ A}$ , 而  $C_{ox} = 154 \text{ pF}$ 、 $C_1 = 46 \text{ pF}$ , 代入式(22)得  $S_l = 0.61 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而根据式(23)计算, 求得  $x_d = 6 \mu\text{m}$  范围内的  $\bar{\tau}_g = 43 \mu\text{s}$ , 取  $\xi = 0$ , 这和根据图 4 中  $\tau_g \sim x_d$  曲线求得的在  $0 \sim 6 \mu\text{m}$  范围内的  $\bar{\tau}_g = 45 \mu\text{s}$  是很一致的。对样品 2, 由式(23)算得  $\bar{\tau}_g(6 \mu\text{m}) = 32 \mu\text{s}$ , 而由图 6 所示的  $\tau_g \sim x_d$  曲线求得  $\bar{\tau}_g(6 \mu\text{m}) = 30 \mu\text{s}$ , 二者也是很一致的。

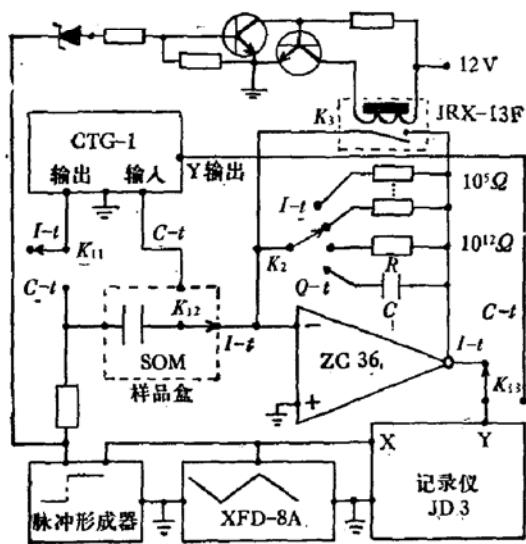


图 2 测量装置图

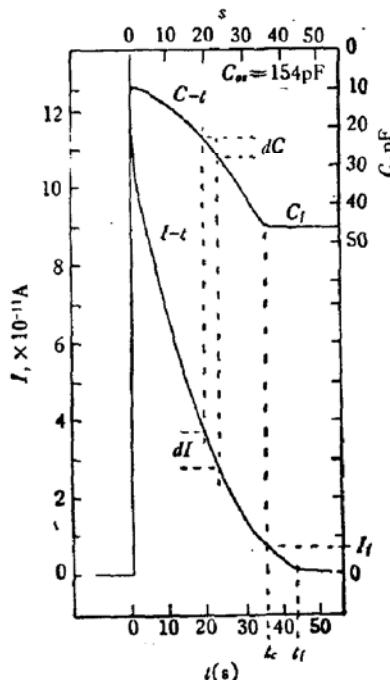


图 3 样品 1 的相关  $I-t$  和  $C-t$  曲线

如果把体产生-复合中心等效为 Au, 取  $\sigma_b = \sigma_{nb} = 2.1 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ <sup>[12]</sup>, 以及取  $v_{th} = 8 \times 10^6 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 则由式(14.2)得

$$N_s(E_t, x) = 3 \times 10^8 \tau_g^{-1}(x),$$

对应图 4 的  $N_s(E_t, x)$  分布, 如图 5 所示。

如取文献[13]所测的结果  $\sigma_{ns}(E_t) = 2.5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ , 以及取  $v_{th} = 8 \times 10^6 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 则由式(13.2)和(13.3)得  $N_s(E_t) = 1.22 \times 10^{10} \cdot S_g (\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1})$ , 对应  $S_g = 0.61 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

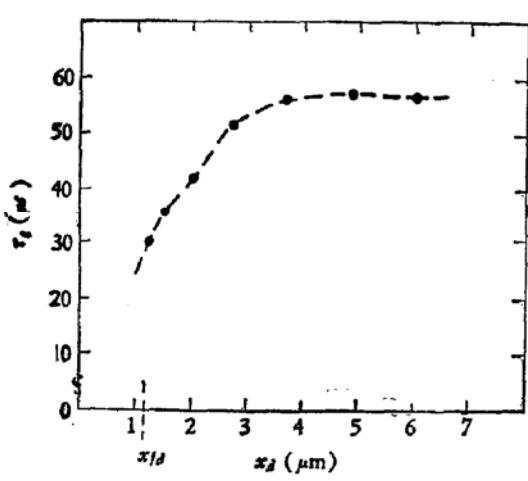


图 4 样品 1 的体产生寿命分布图

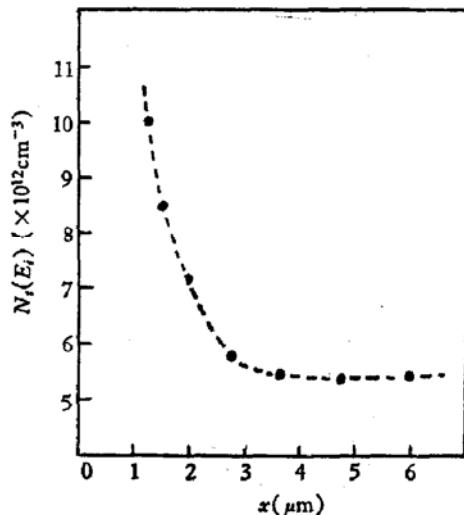


图 5 样品 1 的产生-复合中心密度分布

$$\text{的 } N_s(E_t) = 7.44 \times 10^9 \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}.$$

图 6 为样品 2 的双阶跃脉冲 ( $V_{d1}$  由  $0 \rightarrow -16 \text{V}$ ,  $V_{d2}$  由  $0 \rightarrow -14 \text{V}$ ) 的相关  $I-t$  和  $C-t$  曲线。根据此双脉冲曲线之间的  $\Delta I$  和  $\Delta C$ , 按式(21)算得的  $\tau_g(x_d)$ , 如图 7 中 b 线所示, 而根据  $I_{1-t}$  和  $C_{1-t}$  算得的  $\tau_g(x_d)$ , 如图中 a 线所示, 二者是很一致

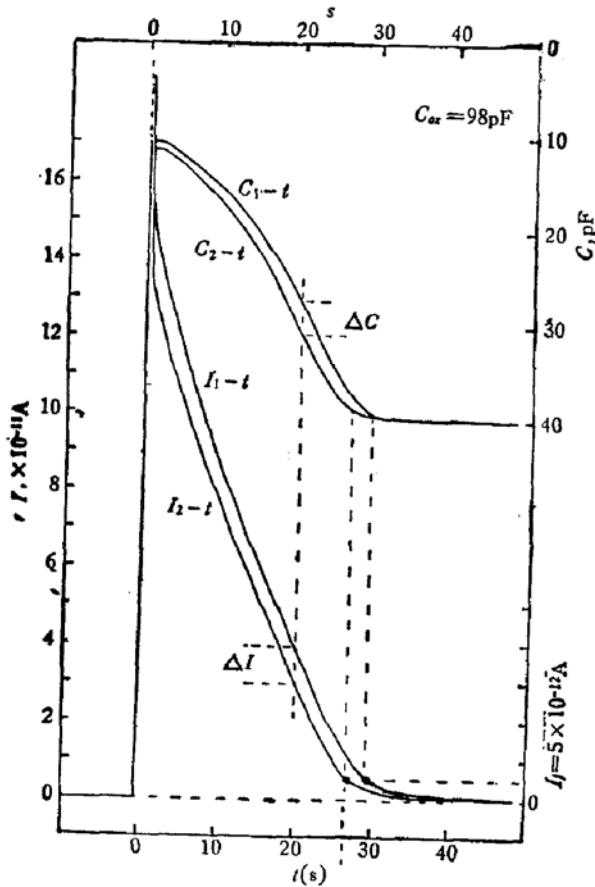


图 6 样品 2 的双阶跃脉冲的相关  $I-t$  和  $C-t$  曲线

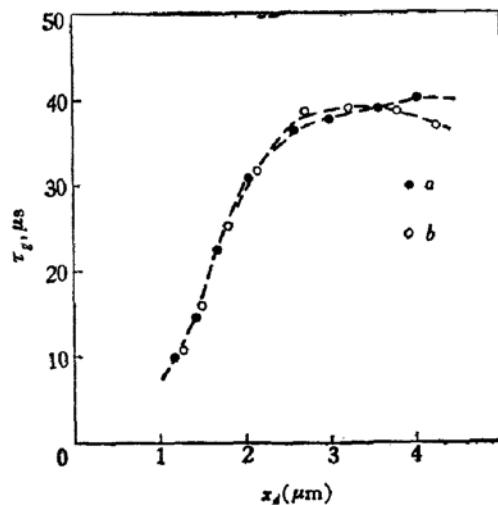


图 7 样品 2 的体产生寿命分布

的。

测试中我们发现不少样品的  $I-t$  曲线在  $t_c$  处有一明显的转折，这转折表明在转折点  $I_{bg}$  已降为零，而  $I_{sg}$  开始下降，所以转折点对应的  $I = I_f$ 。对于有此明显折点的样品，我们可方便地按折点处的  $I$ ，由式(22)计算  $S_g$ 。对于  $S_g$  较大的样品转折后  $I$  迅速下降，如图 8 所示，图中折点处的  $I_f = 2.4 \times 10^{-10} A$ ，对应的  $S_g = 20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $N_{ss}(E_f) = 2.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。对于  $S_g$  较小的样品，转折后  $I$  下降较慢，如图 6 所示，图中折点处的  $I_f = 5 \times 10^{-12} A$ ，对应的  $S_g = 0.43 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $N_{ss}(E_f) = 0.52 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。

图 9 为不同阶跃偏压  $V_s$  所对应的一组  $I-t$  曲线，图中  $V_s$  由  $0 \rightarrow -8V$  遂级变为  $V_s$  由  $0 \rightarrow -28V$ ，从图可见折点处的  $I_f$  几乎不随  $V_s$  变化。这由图 6 也可看出。

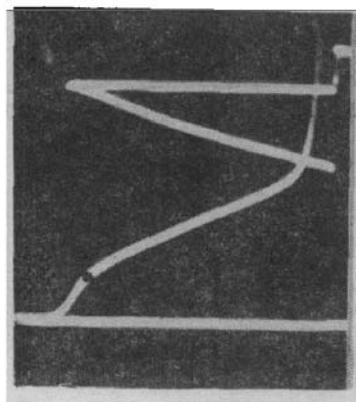


图 8 瞬态快终止时有明显转折的  $I-t$  曲线，样品 4

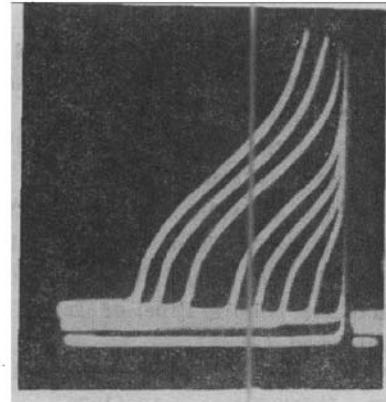


图 9  $I-t$  曲线随阶跃偏压  $V_s$  变化

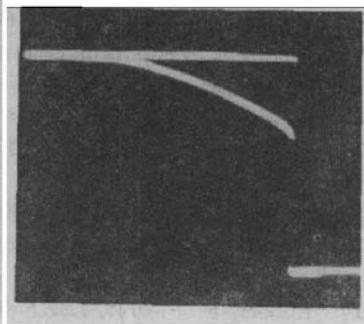


图 10 样品 4 的  $Q-t$  曲线

表 1 (室温,  $V_s: 0 \rightarrow -15V$ )

参数/样品	1	2	3	4	5	6
$t_c$ , 单位 s	36	27	25	3.1	58	105
$I_f, \times 10^{-12} A$	7	5	11	240	3	2.3
$S_g, \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.61	0.43	0.96	20	0.26	0.16
$N_{ss}(E_f), \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$	0.74	0.52	1.17	24.4	0.32	0.20
$\tau_e(1.5\mu\text{m}), \mu\text{s}$	35	16	7		33	138
$\tau_e(5\mu\text{m}), \mu\text{s}$	57	40	50		56	206
$\tau_e(6\mu\text{m}), \mu\text{s}$	43	32	35	5.8	40	164

表 1 为一些样品的测试数据。

从所测样品的  $\tau_e$  分布曲线，如图 4 和 7，我们可看到在界面约  $3\mu\text{m}$  宽的范围内，从体内向界面  $\tau_e$  明显下降，而在  $x_d > 3\mu\text{m}$  的体内  $\tau_e$  基本均匀。这反映器件工艺所造成的二次缺陷、杂质分凝，以及界面影响等所形成的产生-复合中心，集中在约  $3\mu\text{m}$  宽的界面层内，而且越靠界面密度越高，如图 5 所示。

## 四、结语

通过实验和比较，我们认为本文所提出的测量  $\tau_g$  和  $S_g$  的方法，具有测量和计算方便，灵敏度较高误差较小，能直接测定  $\tau_g(x_d)$  分布的优点。本方法有利于用来较深入地分析和测试 MOS 结构，作为质量分析和工艺监控的手段。对于 P 型硅 MOS 样品，本方法同样可应用。

本工作得到吴汝麟教授、郑有料老师和薛自、沈伟奋同志的关心和帮助，上海无线电十四厂为我们提供了样品并在工艺分析中采用了本方法，在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] M. Zerbst, Z. Agnew. Phys., **22**, 30(1966).
- [2] F. P. Heiman, IEEE Trans. Electron. Devices, ED-14, 781(1967).
- [3] Wolf Zechnall and Wolf Gang M. Werner, Solid-St. Electron. **18**, 971(1975).
- [4] Chand R. Viswanathan and Takanori Takino, IEEE Trans. Electron Devices, ED-14, 781(1978).
- [5] K. Board and J. G. Simmons, Solid-St. Electron. **20**, 859(1977).
- [6] K. Taiguchi, Solid-St. Electron. **21**, 1057(1978).
- [7] P. C. T. Roberts and J. D. E. Beynon, Solid-St. Electron. **20**, 221(1978).
- [8] J. G. Simmons and L. S. Wei, Solid-St. Electron. **17**, 181(1974).
- [9] A. S. 格罗夫, 半导体器件物理与工艺, p. 329, 科学出版社(1976).
- [10] N. M. Johnson, D. J. Bartelink, M. Schulz, Proc. of Int. Topical Conf. on the Physics of SiO<sub>2</sub> and Its interfaces. to be published (1978).
- [11] Robert, F. Pierret, IEEE Trans. Electron. Devices, ED-25, 1157(1978).
- [12] 黄昆, 韩汝琦, 半导体物理基础, 科学出版社, p. 100(1979).
- [13] K. L. Wang, IEEE Trans. Electron. Devices, ED-26, 819(1979).

## **Direct Determination of the Bulk Generation Lifetime Distribution and Surface Generation Velocity of Minority Carriers by the MOS-C Transient Current-Capacitance Method**

Sun Qinsheng

(Department of Physics, Nanjing University)

### Abstract

In this paper a sensitive and convenient MOS-C transient current-capacitance method is presented which can be applied to measure directly the bulk generation Lifetime distribution  $\tau_g(x_d)$  and surface generation velocity  $S_g$  of minority carriers in MOS structures from the MOS-C correlative transient current  $I-t$  and transient capacitance  $C-t$  curves. General equation for the MOS-C transient charge, current and capacitance are derived and analyzed. The computation formulae of the interface state density  $N_{ss}(E_i)$ , lifetimes  $\tau_g(x_d)$  and  $\bar{\tau}_g(x_d)$ , and  $S_g$  are derived. It has been found from the measurement results that the bulk generation lifetime decreases markedly from the bulk towards the interface across an approximately 3  $\mu\text{m}$  deep layer.