

饱和电容法快速确定体产生寿命 和表面产生速度

张 秀 森

(复旦大学物理系)
1981年3月23日收到

提 要

本文分析了线性电压扫描下 MOS 电容的 $C-t$ 瞬态响应, 在此基础上, 发展了一种快速确定体产生寿命和表面产生速度的新方法。该方法实验手续和计算均较简单, 适于在需要确定很多样品的体产生寿命和表面产生速度场合下应用。

一、引言

$C-t$ (电容-时间) 瞬态技术已被广泛地用于确定 MOS 结构中的产生参数—体产生寿命和表面产生速度。Zerbst^[1] 的阶跃电压法由于需要在 $C-t$ 曲线上逐点作图求微商, 数据处理非常繁多。Pierret^[2] 和包宗明、苏九令^[3] 的饱和电容法在实验上要以不同的电压扫描率描画若干条 $C-t$ 曲线, 对于寿命较长的样品, 测量变得很费时间。这些方法均需先作“Zerbst 图”, 再由该图的斜率和截距计算体产生寿命和表面产生速度。

在工艺监控和检测中, 以往都利用耗尽的阶跃电压作用下的 $C-t$ 瞬态曲线直接确定体产生寿命^[4-6]。在这类方法中, 为了简化数据处理都忽略了表面产生, 因而不能确定表面产生速度, 在样品的表面产生相对于体产生而言实际上不能忽略时^[5], 这样忽略还将使测得的体产生寿命小于它的真实值。

本文指出, 由耗尽的线性电压扫描 MOS 样品得到的饱和 $C-t$ 曲线, 可以通过与阶跃法类似的简单数据处理而同时确定体产生寿命和表面产生速度两个参数。

二、理 论

对于一个 P 型衬底的 MOS 电容, 如果把金属和半导体间的功函数差、二氧化硅中的各种电荷及界面态电荷等造成的电势差在界面态不变的情况下均归于平带电压 V_{FB} , 那末, 当加于 MOS 电容上的电压以扫描率 α 作反向的线性扫描时, 可以得到下列描写瞬态电容 C 随时间 t 变化的微分方程(文献 [3] 中方程 (7))

$$\alpha - qn_iS_g/C_{ox} = -\frac{qN_A\epsilon_0\epsilon_{si}}{C^3} \frac{dC}{dt} + \frac{qe_0\epsilon_{si}n_i}{2C_{ox}C_f\tau_g} \left(\frac{C_f}{C} - 1 \right) \quad (1)$$

式中 q 为电子电荷, ϵ_0 为真空电容率, ϵ_{si} 为硅的相对介电常数, n_i 为本征载流子浓度,

C 、 C_f 和 C_{ox} 分别为单位面积的瞬态电容、稳定电容和氧化层电容， τ_g 和 S_e 分别为体产生寿命和表面产生速度。

式(1)可以整理后写成

$$\frac{dC}{dt} = AC^2 + BC^3 = (A + BC)C^2. \quad (2)$$

式中

$$A = \frac{n_i}{2N_A C_{ox} \tau_g} \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{N_A \epsilon_0 \sigma_{si}} \left(-\frac{\alpha}{q} + \frac{n_i S_e}{C_{ox}} - \frac{n_i \epsilon_0 \sigma_{si}}{2 C_{ox} C_f \tau_g} \right). \quad (4)$$

若 S_e 为一常数^[1,7,3]，对于一定的 α ，随着时间的增加，反向电压增大，耗尽区将逐渐展宽，瞬态电容 C 将逐渐减小而进入深耗尽态。因而 $\frac{dC}{dt}$ 在这时应是负的。这意味着式(2)中的常数 B 必为负数。这样，当瞬态电容减小到使式(2)中的 $(A + BC) = 0$ 时，就有 $\frac{dC}{dt} = 0$ 。这时耗尽区将不再继续扩展，瞬态电容将达到其饱和值 C_{st} ，故有 $A + BC_{st} = 0$ ，或

$$B = -\frac{A}{C_{st}}. \quad (5)$$

式(5)代入式(2)中消去 B ，得

$$\frac{dC}{dt} = A \left(1 - \frac{C}{C_{st}} \right) C^2. \quad (6)$$

式(6)分离变量，积分之，并利用初始条件 $t = t_0$ 时 $C = C_0$ ，得

$$A(t - t_0) = \frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_{st}} + \frac{1}{C_{st}} \cdot \ln \left[\frac{C}{C_0} \cdot \left(\frac{C_0 - C_{st}}{C - C_{st}} \right) \right]. \quad (7)$$

这就是描写瞬态电容随时间变化的方程式，体产生寿命 τ_g 隐含在常数 A 中。

图1为一个MOS电容在耗尽的线性电压扫描下的饱和 $C-t$ 曲线，扫描是由强反型开

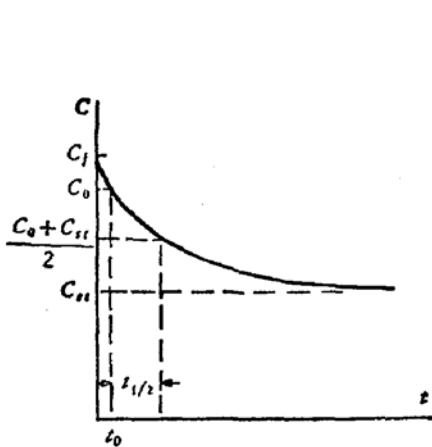


图1 饱和电容法 $C-t$ 曲线

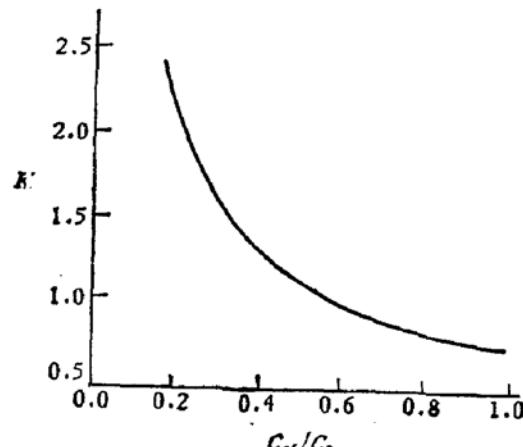


图2 $K \sim C_{st}/C_0$ 函数关系图

表 1 $K \sim C_{st}/C_0$ 函数关系

C_{st}/C_0	K	C_{st}/C_0	K	C_{st}/C_0	K	C_{st}/C_0	K	C_{st}/C_0	K
0.01	33.7	0.21	1.96	0.41	1.19	0.61	0.929	0.81	0.797
0.02	17.0	0.22	1.89	0.42	1.17	0.62	0.920	0.82	0.792
0.03	11.5	0.23	1.82	0.43	1.15	0.63	0.912	0.83	0.787
0.04	8.70	0.24	1.76	0.44	1.14	0.64	0.903	0.84	0.783
0.05	7.04	0.25	1.71	0.45	1.12	0.65	0.896	0.85	0.778
0.06	5.93	0.26	1.66	0.46	1.10	0.66	0.888	0.86	0.774
0.07	5.13	0.27	1.61	0.47	1.09	0.67	0.881	0.87	0.769
0.08	4.54	0.28	1.57	0.48	1.07	0.68	0.873	0.88	0.765
0.09	4.08	0.29	1.53	0.49	1.06	0.69	0.866	0.89	0.761
0.10	3.71	0.30	1.49	0.50	1.05	0.70	0.860	0.90	0.757
0.11	3.40	0.31	1.45	0.51	1.03	0.71	0.853	0.91	0.753
0.12	3.15	0.32	1.42	0.52	1.02	0.72	0.847	0.92	0.749
0.13	2.94	0.33	1.39	0.53	1.01	0.73	0.841	0.93	0.745
0.14	2.75	0.34	1.36	0.54	0.998	0.74	0.835	0.94	0.742
0.15	2.60	0.35	1.33	0.55	0.987	0.75	0.829	0.95	0.738
0.16	2.46	0.36	1.30	0.56	0.977	0.76	0.823	0.96	0.735
0.17	2.33	0.37	1.28	0.57	0.966	0.77	0.818	0.97	0.731
0.18	2.23	0.38	1.26	0.58	0.956	0.78	0.812	0.98	0.728
0.19	2.13	0.39	1.23	0.59	0.947	0.79	0.807	0.99	0.725
0.20	2.04	0.40	1.21	0.60	0.937	0.80	0.802		

始的。若记瞬态电容由 C_0 变至 $\frac{C_0 + C_{st}}{2}$ 的时间为 $t_{\frac{1}{2}}$ (参见图 1), 则由式(7)可得

$$At_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{C_0} \cdot \left[\frac{C_0}{C_{st}} \cdot \ln \left(1 + \frac{C_{st}}{C_0} \right) - \left(\frac{C_0 - C_{st}}{C_0 + C_{st}} \right) \right]. \quad (8)$$

联合式(3)和式(8)即得

$$\tau_s = \frac{n_i C_0}{2 \left[\frac{C_0}{C_{st}} \cdot \ln \left(1 + \frac{C_{st}}{C_0} \right) - \left(\frac{C_0 - C_{st}}{C_0 + C_{st}} \right) \right] N_A C_{ox}} t_{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

把式(9)记为

$$\tau_s = K \frac{n_i C_0}{N_A C_{ox}} t_{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

其中

$$K = 0.5 \times \left[\frac{C_0}{C_{st}} \cdot \ln \left(1 + \frac{C_{st}}{C_0} \right) - \left(\frac{C_0 - C_{st}}{C_0 + C_{st}} \right) \right]^{-1}. \quad (11)$$

显然 K 只与 C_{st}/C_0 有关, K 与 C_{st}/C_0 的函数关系如图 2 和表 1 所示。

这样, 只要在 $C-t$ 曲线上选定了 C_0 , 根据 C_0 和 C_{st} 就可以求出 $t_{\frac{1}{2}}$ 来, 而由图 2 或表 1, K 的值也可立即求出。于是体产生寿命 τ_s 即可由式(10)迅速确定。

体产生寿命一经确定, 由式(3)、(4)和(5), 表面产生速度 S_s 可由下式求出:

$$S_s = \frac{\alpha C_{ox}}{qn_i} - \frac{e_0 \sigma_{st}}{2\tau_s C_f} \left(\frac{C_f}{C_{st}} - 1 \right). \quad (12)$$

此外,由图2可见,在测试中通常采用的 $C_{st}/C_0 \geq 0.50$ 范围内, K 与 C_{st}/C_0 的关系可用一直线加以近似,由此可得一非常简单的直接计算体产生寿命 τ_s 的近似公式:

$$\tau_s = \frac{n_i(1.3C_0 - 0.6C_{st})}{N_A C_{ox}} t^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

误差计算表明,在 $C_{st}/C_0 \geq 0.50$ 范围内,近似公式(13)与(9)相比,给出的体产生寿命相对误差小于 $\pm 5\%$,显然,这已经很好地处于这类测试所允许的误差范围以内。

三、实验和结果

实验中所用的 MOS 电容是在〈100〉晶向的 n 型硅片上制作的,材料的电阻率约为 $8-12 \Omega \cdot \text{cm}$ 。抛光后的硅片化学剥离约 $3 \mu\text{m}$ 厚的表面层,然后在 1000°C 的氧化气氛中生长厚约 1500 \AA 的氧化层,并在 890°C 下对样品进行磷处理,接着蒸发厚度约为 $1.5 \mu\text{m}$ 的铝层,最后完成 MOS 电容图形的光刻。图形面积为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$,带有保护环。

线性扫描电压由 XFD-8 超低频讯号发生器产生,高频 MOS 电容由 CTG-1 电容测试仪测量,并由 X-Y 记录仪记录 $C-t$ 曲线。

图3示出了一个样品的测试结果。图中的圆点为本文方法在不同电压扫描率下测定的值,虚线表示用文献[3]方法测定的值。由图可见,本文方法在不同电压扫描率下的测试结果之间相当一致,与文献[3]方法的结果也符合甚好。

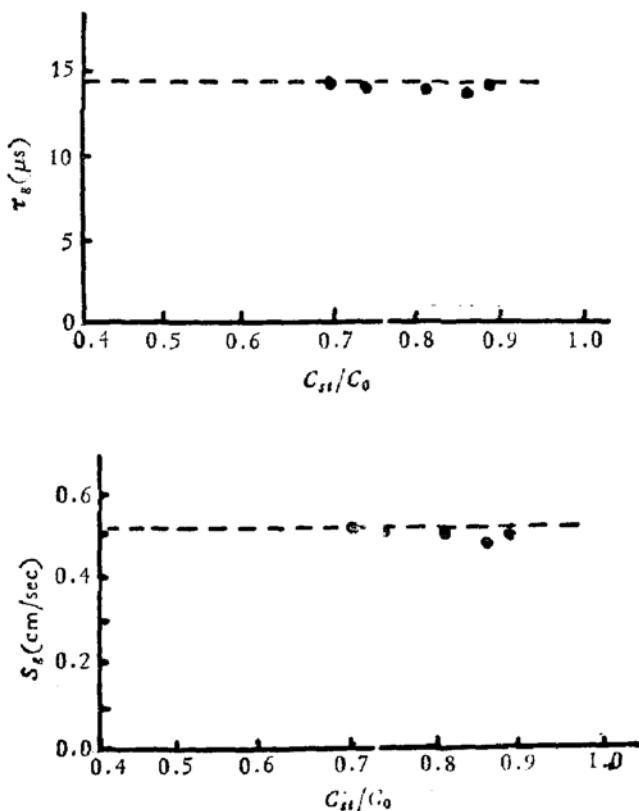


图3 一个样品的体产生寿命和表面产生速度测试结果

四、讨论和结论

本文方法虽不需作“Zerbst 图”，但在原理上与方法 [1] 和 [3] 完全等价。因此造成“Zerbst 图”非线性的非稳态产生效应^[8]、界面态发射^[9]、产生区宽度不确定性^[10]和表面附近强场区的带间碰撞产生^[11]等都有可能使基本方程(1)失效，而成为测量误差的来源。无法确知具体样品的“Zerbst 图”线性区范围，这是所有直接计算法的固有缺点。减小这类误差的一般办法是：选择恰当的 C_0 点，以避开瞬态开始期间的非线性区；并选择合适的电压扫描率，太小的电压扫描率会使线性区范围过小，也容易增加读数误差，太大的电压扫描率会使相应的饱和电容 C_{ss} 超出线性区范围。

最后应该指出的是，注意到在确定 K 和 τ_g 的公式中，有关电容值仅以比值形式出现，故在用本文方法确定体产生寿命时，可直接用实验测得的电容值进行计算，不必换算成单位面积电容值，这无疑是十分便利的。

本工作得到谢希德教授的关怀，包宗明、苏九令老师作了具体指导，上海元件五厂黄慧玲、许寿祥同志为本工作提供样品，谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] M. Zerbst, Z. Agnew. *Phys.*, **22**, 30 (1966).
- [2] R. F. Pierret, *IEEE Trans. Electron Dev.*, ED-19, 869 (1972).
- [3] 包宗明、苏九令, 物理学报, **29**, 693 (1980).
- [4] F. P. Heiman, *IEEE Trans. Electron Dev.*, ED-14, 781 (1967).
- [5] D. K. Schroder and J. Guldberg, *Solid-St. Electron.*, **14**, 1285 (1971).
- [6] 程文超、黄振岗, 半导体学报, **1**, 228 (1980).
- [7] H. Preier, *IEEE Trans. Electron Dev.*, ED-15, 990 (1968).
- [8] J. G. Simmons and L. S. Wei, *Solid-St. Electron.*, **19**, 153 (1976).
- [9] P. U. Calzolari, S. Graffi and G. Pierini, *Solid-St. Electron.*, **19**, 325 (1976).
- [10] J. L. Prince, J. H. Wortman and J. R. Hauser, *Proc. IEEE*, **58**, 842 (1970).
- [11] C. T. Sah and H. S. Fu, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **11**, 297 (1972).

Rapid Determination of Bulk Generation Lifetime and Surface Generation Velocity by Saturation Capacitance Method

Zhang Xiumiao

(Department of Physics, Fudan University)

Abstract

A new rapid method for determining bulk generation lifetime and surface generation velocity is suggested on the basis of the analysis of a MOS capacitance $C-t$ transient response to a linear voltage sweep. Both the experimental procedure and the calculation involved are relatively simple, therefore the method is more suitable for cases in which measurements of lifetime and surface generation velocity of a large number of samples are necessary.