

新生界面陷阱对 Fowler-Nordheim 电压漂移的影响

谭长华 许铭真 王阳元

(北京大学计算机科学技术系)

1988年11月11日收到

用陷阱俘获模型和恒流方法研究了新生界面陷阱对薄氧化层 MOS 电容器的 F-N(Fowler-Nordheim)电压(V_{FN})的影响,得到了电压漂移量 ΔV_{FN} 随时间变化的解析表述式。分析结果表明: $\frac{d\Delta V_{FN}}{dt}$ vs ΔV_{FN} 曲线可以用几段直线描述。采用线性化技术,可以方便地识别多陷阱现象。并分别提取原生陷阱及新生陷阱参数。实验结果表明:在恒流隧道电子注入的初始阶段, F-N 电压漂移量主要由新生界面陷阱的电子俘获过程所决定,紧接着是原生氧化层体陷阱的电子俘获,然后是新生氧化层体陷阱的电子俘获。

主题词: 新生界面陷阱, 氧化层体陷阱, 薄氧化层, 恒流应力, 线性化技术

一、前言

在 MOS 器件的制备过程中,由于采用了多种高能束流的加工工艺,在绝缘层中引入了相当数量的缺陷,我们称这类缺陷为原生陷阱。这类陷阱对载流子有明显的俘获作用,从而引起 MOS 平带电压的漂移,并表现为一种典型的弛豫饱和现象。用平带电压的时变特性可以获得原生电子陷阱的信息^[1-6]。随着 VLSI 集成度的不断提高,按等比例缩小的原则,绝缘膜厚度减至小于 200 Å 时,其工作电场强度可达 2—8 MV/cm。在绝缘层中,由于高场及隧道电子注入,具有足够能量的电子将与 SiO₂ 的晶格原子碰撞,并产生新的体缺陷,称为氧化层新生体陷阱。它们与原生陷阱一起,对注入电子产生俘获效应,并影响 SiO₂ 的电导过程,从而引起恒流隧道电子注入条件下的 F-N 电压时变现象,其特点是无饱和趋势,并在足够长的时间以后呈线性变化关系^[4,7,8]。近期的研究结果表明,在隧道电子注入的初始,即有大量的新生界面陷阱的产生,并有饱和趋势^[11,12],关于新生介面陷阱对于恒流隧道电子注入条件下的 F-N 电压弛豫过程的影响,至今尚未见报道。新生介面陷阱如何影响 F-N 电压弛豫特性,能否从弛豫特性曲线直接分离出上述三种陷阱效应,这是薄 SiO₂ 高场电导要解决的问题之一,也是本文的研究目的。

二、原 理

1. 恒流状态下的 MOS 电容器端电压的时变关系式

对于二氧化硅，其隧道穿透电流可用众所周知的 Fowler-Nordheim 场发射电流关系式表示：

$$J = AE^2 \exp(-B/E) \quad (1)$$

其中， A, B 为常数， E 为二氧化硅的电子注入端(阴极)之电场强度。

在恒流条件下， $\frac{dJ}{dt} = 0$ ，由(1)式得到

$$\frac{dE}{dt} = 0 \quad (2)$$

电子的隧道注入端之电场强度可以表示为：

$$E = V_i/T_i = (V_{PN} - V_{PB} - \phi_s)/T_i \quad (3)$$

其中， T_i 为 SiO_2 厚度， V_i 为 SiO_2 的电压降， V_{PN} 为 MOS 端电压， V_{PB} 是 MOS 平带电压， ϕ_s 是半导体表面势。 V_{PB} 可以表示为：

$$V_{PB} = \phi_{AB} + \Delta V_{ss} + \Delta V_{tr} \quad (4)$$

其中， ϕ_{AB} 为 SiO_2 两侧材料的接触电势差， ΔV_{ss} 和 ΔV_{tr} 分别为界面陷阱电荷和 SiO_2 中的体陷阱电荷所引起的平带电压漂移量。

由(2)一(4)式，得到

$$\frac{dV_{PN}}{dt} = \frac{d\Delta V_{ss}}{dt} + \frac{d\Delta V_{tr}}{dt} + \frac{d\phi_s}{dt} \quad (5)$$

在强积累或强反型状态下，作为一级近似，可以认为

$$\frac{d\phi_s}{dt} \approx 0.$$

所以，在恒流条件下，MOS 系统的端电压的时变关系主要由界面陷阱电荷的时变关系和绝缘层中的体陷阱电荷的时变关系所决定。

2. 陷阱俘获速率及陷阱中电子的弛豫过程

设 SiO_2 导带中的电子浓度为 n ，陷阱密度为 N_{tr} ，陷阱俘获的电子密度为 n_{tr} ，忽略陷阱电子发射过程的一级俘获速率方程式可以写为：

$$dn_{tr}/dt = \frac{\sigma J}{q} (N_{tr} - n_{tr}) \quad (6)$$

式中， σ 为电子俘获截面， J 是电流密度

$$J = qv_{th}n \quad (7)$$

q 是电子电荷， v_{th} 是电子热运动速度。

我们讨论一种普遍的情况，认为 N_{tr} 是时间的函数。在高场热电子的作用下，产生的新的陷阱状态就属于这种情况。这时，(6)式的通解可以写成下列形式：

$$n_{tr}(t) = c_1 e^{-t/\tau_0} + \frac{1}{\tau_0} \int_0^t N_{tr}(t') e^{-\frac{1}{\tau_0}(t-t')} dt' \quad (8)$$

式中, $\tau_0 = q/\sigma J$; c_1 为常数, 其值由初始条件决定。

所以, 只要已知陷阱密度 N_{ss} 的具体函数形式, 就可以求出相应的陷阱俘获的电子的驰豫过程。

3. 新生界面陷阱的俘获效应

Si/SiO_2 界面的原生陷阱密度一般较低 ($\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$), 在强积累或强反型状态下, 能够与半导体建立载流子的平衡状态, 它们对于隧道穿透电子的俘获作用可以略之不计。在高电场下, 由栅极注入的电子穿过 SiO_2 势垒以后, 在 SiO_2 导带中运动。只要不发生碰撞, 它们到达 Si/SiO_2 界面时, 具有最大动能。当电子与界面附近的原子碰撞时, 可能打破 Si-O 键, 或使界面原子产生位移, 从而形成新的界面陷阱。近期的研究工作表明, 新生界面陷阱多产生在隧道电流注入的初期阶段, 并渐趋饱和^[11,12]。因此, 可以假设新生界面陷阱密度 $N_{ss}(t)$ 具有下述指数形式:

$$N_{ss}(t) = N_{ss}(\infty)(1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (9)$$

式中, τ_1 是时间常数, 可由实验确定。

设 $t = 0$ 时, 新生界面陷阱俘获的电子数为零, 即 $n_{ss} = 0$ 。用(8)和(9)式, 得到新生界面陷阱中的电子的面密度的时变特性为:

$$n_{ss} = N_{ss}(\infty) \left\{ (1 - e^{-t/\tau_1}) - \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_s} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_s}) \right\} \quad (10)$$

其中, $\tau_s = q/\sigma_s J$, σ_s 为界面陷阱的俘获截面。

若新生界面陷阱的产生很快, 以至于 $\tau_1 \ll \tau_s$, 则有

$$N_{ss}(t) \approx N_{ss}(\infty)$$

和

$$n_{ss}(t) \approx N_{ss}(\infty)(1 - e^{-t/\tau_s}) \quad (11)$$

4. 新生界面陷阱的电子俘获引起的电压时变关系

图 1 给出负栅电子注入的 MOS 电容器能带图。初始, 施加在 MOS 栅上的电压为

$V_{FN}(0)$, 新生界面陷阱一旦产生, 其相应的态密度用 $D_{ss} (\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1})$ 表示, E_{F1} 表示新生界面陷阱处于电中性状态时的费米能级, E_{Fn} 为阴极电子注入处的费米能级。在较强的隧道电子注入的条件下, SiO_2 导带中有相当数量的电子, 绝缘膜可以看作半透明状态。 SiO_2 导带中的电子注入新生 Si/SiO_2 界面陷阱, 由于电子填充界面陷阱, 使新生界面陷阱的费米能级上升一个增量 ΔE_{F1} , 而且

$$\Delta E_{F1} = n_{ss}/D_{ss} \quad (12)$$

用高斯定理, 可以求得 n_{ss} 在 SiO_2 中引起的电场变化量

$$\Delta F_1 = q n_{ss}/\epsilon_0 \epsilon_1 \quad (13)$$

其中, ϵ_0 和 ϵ_1 分别为真空电容率和 SiO_2 介电常数。

相应的 SiO_2 上的电压变化量为

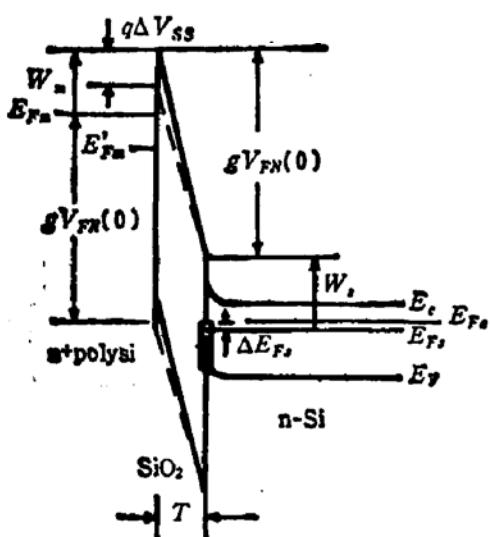


图 1 MOS 电容器能带图

$$\Delta V_{ss} = qn_{ss}/c_i \quad (14)$$

c_i 是单位面积 SiO_2 电容。

用文献[13]的分析方法, 可以得到新生界面陷阱密度 D_{ss} 与 ΔV_{ss} 的关系

$$\Delta V_{ss} = \frac{D_{ss}}{D_{ss} + c_i/q^2} \left(\frac{W_s - W_n}{q} \right) \quad (15)$$

或

$$D_{ss} = \frac{c_i/q^2}{(W_s - W_n)/q\Delta V_{ss} - 1} \quad (16)$$

其中, W_s 和 W_n 分别为新生界面陷阱和电子注入阴极的功函数,

$$(W_s - W_n)/q \approx \frac{2}{3} E_s/q,$$

E_s 是 Si 的禁带宽度。所以, 当 $D_{ss} \rightarrow \infty$ 时, ΔV_{ss} 的最大变化量为 $\frac{2}{3} E_s/q$ 。

由上述讨论可以看出, 由于新生界面陷阱俘获电子的结果, 阴极电子注入端的电场将减小 ΔF_s , 势必导致注入隧道电流下降。在恒定电流的条件下, MOS 的端电压将增加, 以补偿由于新生界面陷阱电荷引起的电场降低。这类似于体陷阱俘获电子的现象。

上述讨论中, 认为新生界面陷阱的密度很高, 对半导体一侧的影响可以略之不计。

5. 氧化层体陷阱的电子俘获效应

利用(8)式, 可以求出相应的解。

(1) 原生体陷阱的俘获效应

设原生体陷阱密度为 $N_s = N_{0s}$; $t = 0$ 时, $n_{0s} = 0$ 。用(8)式, 得到

$$n_{0s}(t) = N_{0s}(1 - e^{-t/\tau_s}) \quad (17)$$

式中, $\tau_s = q/\sigma_s J$, σ_s 是原生体陷阱对电子的俘获截面。

(2) 新生体陷阱的电子俘获效应

设新生体陷阱密度为 $N_{0g}(t)$, 产生率为 G , 则有

$$N_{0g}(t) = Gt \quad (18)$$

若 $t = 0$ 时, $n_{0g} = 0$ 。用(8)式得到

$$n_{0g}(t) = G[t - \tau_g(1 - e^{-t/\tau_g})] \quad (19)$$

式中, $\tau_g = q/\sigma_g J$, σ_g 为新生体陷阱对电子的俘获截面。

6. 原生及新生体陷阱电荷所决定的电压时变关系^[7,8,10]

设 \bar{x}_s, \bar{x}_g 分别为原生及新生体陷阱电荷密度的矩心, 那么, 由体陷阱电荷引起的电压变化量为

$$\Delta V_{ss} = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_i} \{ \bar{x}_s N_{0s} (1 - e^{-t/\tau_s}) + \bar{x}_g G [t - \tau_g (1 - e^{-t/\tau_g})] \} \quad (20)$$

7. MOS 系统的总电压弛豫特性

由(10), (14)和(20)式, 得到包括新生界面陷阱, 原生及新生体陷阱的电子俘获效应的 MOS 系统总电压的时变关系:

$$\Delta V_{FN} = \frac{q}{\sigma_0 \sigma_i} \left\{ T_i N_{ii}(\infty) \left[(1 - e^{-t/\tau_i}) - \frac{\tau_i}{\tau_i - \tau_s} (e^{-t/\tau_i} - e^{-t/\tau_s}) \right] + \bar{x}_p N_{0p}(1 - e^{-t/\tau_p}) + \bar{x}_s G[t - \tau_s(1 - e^{-t/\tau_s})] \right\} \quad (21)$$

由(21)式,可以得到如下关系式

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\Delta V_{FN}) &= \frac{1}{\tau_i} [\Delta V_{ii}(\infty) - \Delta V_{ii}] + \frac{1}{\tau_p} [\Delta V_{0p}(\infty) - \Delta V_{0p}] \\ &\quad + \frac{1}{\tau_s} [\Delta V_{0s}(t) - \Delta V_{0s}] \end{aligned} \quad (22)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta V_{ii}(\infty) &= \frac{qT_i}{\sigma_0 \sigma_i} N_{ii}(\infty), \Delta V_{0p}(\infty) = \frac{q\bar{x}_p}{\sigma_0 \sigma_i} N_{0p}, \\ \Delta V_{0s}(t) &= \frac{q\bar{x}_s}{\sigma_0 \sigma_i} N_{0s}(t) \end{aligned}$$

由(21),(22)式可以看出,若满足 $\tau_i < \tau_p < \tau_s$ 条件,将依新生界面陷阱,原生体陷阱,新生体陷阱的电子俘获过程的先后顺序,对 MOS 系统电压弛豫特性产生影响。这种趋势已在实验结果中得到了明确的证实,如图 4 所示。

三、实验与结果

1. 样品

N型 Si 单晶片,〈100〉晶向,电阻率为 $4\Omega\text{cm}$, Ar-O₂ 热生长 SiO₂, 厚度为 210\AA 。
N⁺-poly-Si 槽 MOS 电容器,栅面积为 $1.5 \times 10^{-3}\text{cm}^2$ 。

2. 测量装置

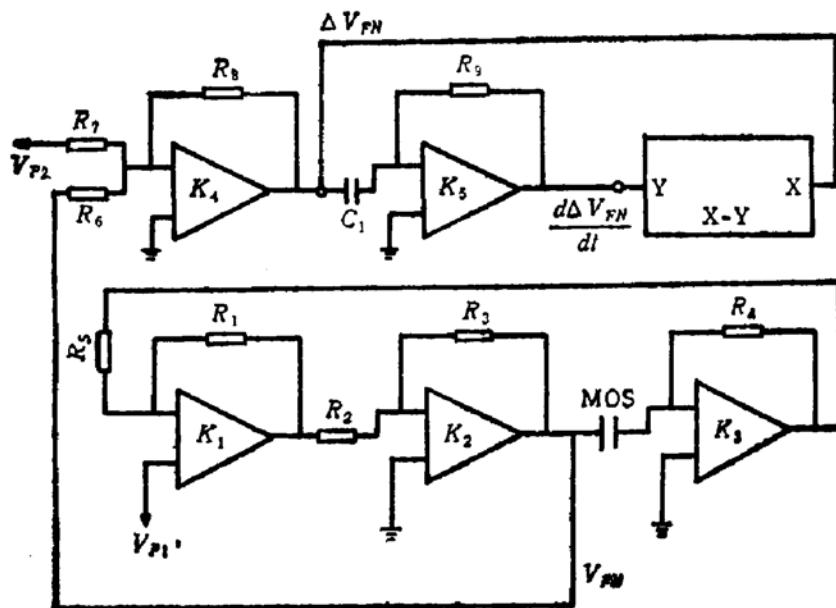


图 2 恒流测试装置方框图

图 2 给出恒流实验装置方框图。运算放大器 K_1, K_2, K_3 组成恒流反馈电路。 K_4 是电流计，检测隧道注入电流的大小。 K_1, K_2 为串联使用的运算放大器， K_2 提供足够大的偏置摆幅。 V_{p1} 是参考电压源，用来调节 MOS 栅电压的数值、极性。 K_4 是比较放大器， V_{p2} 是补偿电压源。当设定栅电压的数值及极性以后，可以调节 V_{p2} ，使 K_4 的输出为零，便于测量较小的 F-N 电压变化量 ΔV_{FN} 。 K_5 是微分器，它给出 $d\Delta V_{FN}/dt$ 的数值。将 ΔV_{FN} 和 $d\Delta V_{FN}/dt$ 输入 $x-y$ 记录仪，得到 $d\Delta V_{FN}/dt$ vs ΔV_{FN} 实验曲线。

3. 测量结果

图 3、4 分别给出恒定隧道电流注入条件下的 $\Delta V_{FN}-t$ 曲线及 $\frac{d\Delta V_{FN}}{dt}-\Delta V_{FN}$ 曲线。

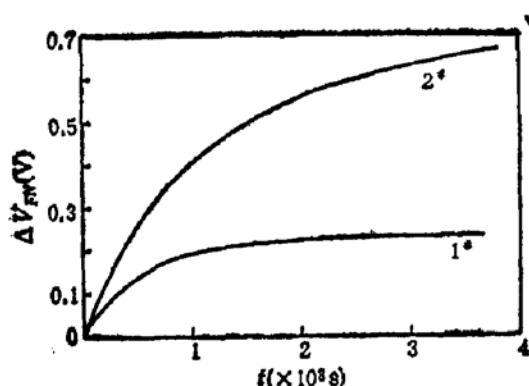


图 3

$\Delta V_{FN}-t$ 实验曲线
1* $j = 1.5 \times 10^{-6} A/cm^2$
2* $j = 7.0 \times 10^{-6} A/cm^2$

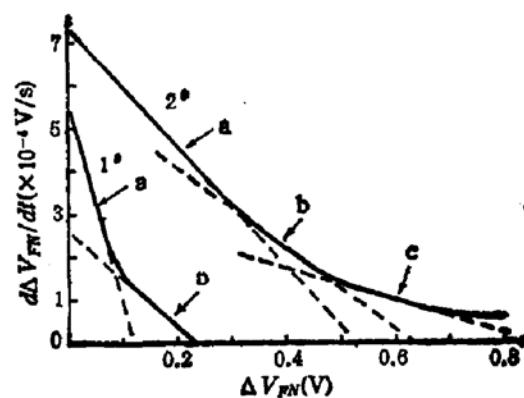


图 4

$\frac{d\Delta V_{FN}}{dt}-\Delta V_{FN}$ 实验曲线

* 新生界面陷阱, b 原生体陷阱, c 新生体陷阱

在图 3 中，注入电流密度为 $1.5 \times 10^{-6} A/cm^2$ 的曲线随着时间趋向饱和，而注入电流密度为 $7.0 \times 10^{-6} A/cm^2$ 的曲线是不饱和的。图 4 给出的实验线是由几段直线组成的，这说明，在恒流注入的各个阶段是不同的陷阱在起主要作用。用各段直线的斜率，它们在横坐标轴上的截距，以及 ΔV_{FN} 很大时的 $d\Delta V_{FN}/dt$ 值，得到如下表 1 的实验结果：

表 1

N_s	D_{ss}^* ($cm^{-2} \cdot eV^{-1}$)	σ_s (cm^2)	$\bar{x}_s N_{sp}^*$ (cm^{-1})	σ_p (cm^2)	$\bar{x}_s N_{sp}(s)$ (cm^{-1})	σ_g (cm^2)	g
1*	1.9×10^{11}	5.1×10^{-16}	2.4×10^3	1.2×10^{-16}	/	/	/
2*	2.6×10^{12}	3.2×10^{-19}	2.4×10^3	2.1×10^{-19}	4.8×10^3	8.5×10^{-20}	2.7×10^{-8}

其中， $g = \frac{q}{J} G$ 为注入一个电子所产生的体陷阱数。

用频谱分析方法^[14]，测得的界面态密度与表中列出的 D_{ss} 数据是一致的。

四、讨论与结论

本文研究了恒定隧道电流注入条件下的各种陷阱的行径。首先产生界面陷阱，并决定着注入初期的电压弛豫；然后是原生体陷阱对隧道注入电子的俘获效应；最后，是新生体陷阱的电子俘获过程。

本文研究了新生界面陷阱的俘获机理。新生界面陷阱的俘获效应可以用简单的陷阱俘获模型来描述。在恒定隧道电流注入条件下，总的 MOS 系统端电压不仅决定于体陷阱电荷的状态，也决定于界面陷阱的电荷状态。在隧道电子注入的各个阶段，界面陷阱对电压时变关系的影响是不同的。

直接测量 $\frac{d\Delta V_{PN}}{dt}$ vs ΔV_{PN} 的函数关系，可对具有指数函数关系的陷阱现象进行线性化处理，从而进行陷阱分离，并确定相应的陷阱参数。

本文提出的界面陷阱俘获模型和实验方法，对 SiO_2 中的陷阱研究是有价值的。

参 考 文 献

- [1] E. H. Nicollian, C. N. Berglund, P. F. Schmidt and J. M. Andrews, *J. Appl. Phys.*, **42**, 5654 (1971).
- [2] T. H. Ning and H. N. Yu, *J. Appl. Phys.*, **45**, 5373 (1974).
- [3] D. J. Dimaria, The Physics of SiO_2 and its interfaces proceeding of the international topical conference, 160 (1978).
- [4] 郑有炓, 吴风美, 半导体学报, **3**, 55(1982).
- [5] 史常忻, 顾为芳, 半导体学报, **4**, 383(1983).
- [6] 朱文珍, 常秀勤, 李月霞, 安贵仁, 宁华, 半导体学报, **6**, 41(1985).
- [7] M. S. Liang and C. Hu, Tech. Digest Intern'l Electron Dev. Meeting, 396 (1981).
- [8] I. C. Chen, S. E. Holland and C. Hu, *IEEE Trans.*, **ED-32**, 413(1985).
- [9] Y. Nissan-cohen, J. Shappier and D. Frohman-Bentchkowsky, *J. Appl. Phys.*, **60**, 2024 (1986).
- [10] C. F. Chen and C. Y. Wu, *J. Appl. Phys.*, **60**, 3926 (1986).
- [11] Seiji Hariguchi, Toshio kohagash and kazuyuki saito , *J. Appl. Phys.*, **58**, 387 (1985).
- [12] E. Avni, Y. Sonnenblick and Y. Nissan-Cohen, *Solid-St. Electron.*, **31**, 245 (1988).
- [13] A. M. Cowley and S. M. Sze, *J. Appl. Phys.*, **36**, 3212 (1965).
- [14] M. Z. Xu and C. H. Tan, *Solid-st. Electron.*, **28**, 1145(1986).

Effect of New Generated Interface Traps on Fowler-Nordheim Voltage Shift

Tan Changhua, Xu Mingzhen and Wang Yangyuan

(Department of Computer Sci. & Tech., Peking University, Beijing, China)

Abstract

Electron trapping model and constant current stress have been used to study the effect of new generated interface traps on F-N (Fowler-Nordheim) voltage, V_{FN} , in thin SiO_2 MOS capacitors. The constant current-stressed voltage-time ($\Delta V_{FN}-t$) analytic expressions have been obtained. It is obvious that $d\Delta V_{FN}/dt$ vs ΔV_{FN} curve can be separated into three components which are all linear decreasing lines.

A linearized technique has been developed to distinguish conveniently multi-trap phenomenon and extract the trap parameters of the pre-existing traps and that of the new generated traps, respectively.

The experimental results show that after the constant current tunneling injection of electron into the thin oxide, the initial F-N voltage shift is governed predominantly by the electron trapping of the new generated interface traps, then by the pre-existing bulk oxide traps, and followed by that of the new generated oxide traps.

KEY WORDS Thin SiO_2 , New generated interface traps, Bulk oxide traps, constant current stress, Linearizing technique