

# 电场对 TSIC 测量的影响

谭长华 许铭真

(北京大学计算机科学技术系)

1982年9月2日收到

## 提 要

本文用场增强热激发界面陷阱模型分析了 TSIC 曲线峰位温度与外加电场强度之间的关系, 分析结果表明: 用 TSIC 曲线峰位温度所确定的最可几陷阱深度是有效陷阱深度; 用 Poole-Frenkel 效应解释了有效陷阱深度与电场强度之间的关系; 为了确定最可几陷阱深度, 实验结果必须做修正, 其修正量相当于 Poole-Frenkel 降低量, 当电场强度为  $10^6 \text{V/cm}$  时, 大约为  $0.386 \text{eV}$ 。

## 一、前 言

用陷阱模型来研究热激发电子、空穴或可动离子的输运现象, 可以追溯到早期的经典工作。Randall<sup>[1]</sup> 等人首先用陷阱模型解释了光电导型磷光体的热致发光现象。他们分析了单一能级, 均匀分布能级, 指数分布能级等几种情况, 得到了实验与理论分析相一致的结果。这是 TSG 法。Saunders<sup>[2]</sup> 等人考虑了再俘获效应, 将陷阱模型成功地用于半导体的深能级杂质的分析工作。Simmons<sup>[3]</sup> 等人用线性升温条件, 对热激发电流方程作了近似处理, 较成功地分析了 MOS 介质层中载流子陷阱的能量分布。这是 TSC 法。Hickmott<sup>[4]</sup> 用双曲线升温条件, 分析了单能级可动离子界面陷阱, 得到了热激发可动离子电流的解析式。Boudry<sup>[5]</sup> 等人分析了连续分布能级的可动离子界面陷阱, 得到了相应的结果。这是 TSIC 法。目前, TSIC 法已较成功地用于 MOS 介质层中可动离子介面陷阱及其能量分布的研究<sup>[6-8]</sup>。然而, 从实验可观察到, 外加电场强度的大小明显地影响 TSIC 曲线的形状和峰位温度  $T_m$  的大小<sup>[4-6]</sup>。因此, 用 TSIC 法测定的可动离子最可几陷阱深度存在相当的分散性。关于电场的影响, Eldridge<sup>[9]</sup> 在研究可动离子的弛豫过程时, 把电场作为一个机动参数引入过。但是, 由于采用了介质层内均匀浅陷阱模型, 使之得到的最可几陷阱深度仍然偏低。

大量的 TSIC 实验结果表明: 在 MOS 系统中, 氧化物的两个介面存在深的离子陷阱, 而体内是浅陷阱。存在于 Si-SiO<sub>2</sub> 或 SiO<sub>2</sub>-金属介面深陷阱中的可动离子, 一旦获得足够的能量就发射出来并被外加电场驱赶到氧化物的另一介面, 在那里重新被陷。并且, 电场越强, 陷阱中可动离子的发射率越高。然而, 电场的作用是 Frenkel 效应<sup>[10]</sup>, 还是 Lax 效应<sup>[11]</sup>, 或者是其它效应? 电场强度与最可几陷阱深度的定量关系如何?

本文用场增强热激发界面陷阱模型分析了 TSIC 的实验结果, 证实了, 电场对 TSIC 测

量结果的影响以 Frenkel 效应为主。

## 二、理论分析

### 1. 场增强热激发界面陷阱模型

当 MOS 处于恒定的偏置电场下，并逐渐升高环境温度；或处于恒定的温度下，并逐渐增加偏置电场时，可动离子跃迁出陷阱的过程是“热激发”和“场增强发射”的双重作用结果。图 1 为场增强热激发界面陷阱模型示意图。其中， $E_0$  为可动离子的最可几陷阱深度（或称为实际陷阱深度）； $E_e$  为有效最可几陷阱深度（或称为有效陷阱深度）； $\Delta E$  为沿电场方向的陷阱势垒降低量，它仅与电场强度有关，而与升温模式无关。并且，

$$E_e = E_0 - \Delta E \quad (1)$$

在电场的作用下，当 MOS 的环境温度为  $T$  时，可动离子的热激发几率  $P$  由下式表述：

$$P = S \exp(-E_e/kT), \quad (2)$$

其中， $S$  为跃迁频率。

### 2. Poole-Frenkel 效应

沿电场方向，陷阱势垒的降低量  $\Delta E$  与电场强度  $F$  之间的关系为：

$$\Delta E = \beta \sqrt{F} \quad (3)$$

其中，

$$\beta = (q^3 / \pi \epsilon_0 \epsilon_i)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$\epsilon_0$ 、 $\epsilon_i$  分别为真空电容率和  $\text{SiO}_2$  介电常数。

通常，TSIC 曲线的测量是在一定的偏置电场下进行的。所以，由 TSIC 曲线的峰位温度  $T_m$  确定的陷阱深度是有效陷阱深度  $E_e$ 。由 (1)、(3) 式得到它与电场强度  $F$  的关系为：

$$E_e = E_0 - \beta \sqrt{F}. \quad (5)$$

### 3. 场增强热激发离子电流方程

我们仍用单能级陷阱模型<sup>[1,4]</sup>讨论 MOS 系统中的可动离子输运过程。在强电场的作用下，忽略陷阱对可动离子的再俘获过程，热激发离子电流可以表述为

$$J_i = -q \frac{dn_i}{dt} = q n_i p, \quad (6)$$

其中， $n_i$  为  $t$  时刻陷阱中的可动离子面密度。由 (2)、(5)、(6) 式得到离子电流方程：

$$J_i = q n_0 S \exp \left[ -\frac{E_0 - \beta \sqrt{F}}{KT} - S \int_0^t e^{-\frac{E_0 - \beta \sqrt{F}}{KT} dt} \right], \quad (7)$$

其中， $n_0$  为初始 ( $t = 0$ ) 陷阱中可动离子面密度。

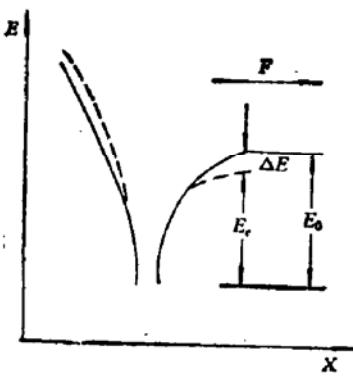


图 1 陷阱模型示意图

#### 4. TSIC 峰位温度与外电场之间的关系

在线性升温条件下<sup>[3]</sup>,

$$T = T_0 + \alpha t \quad (8)$$

$T_0$  为初始温度,  $\alpha$  为温度扫描速率,  $t$  为扫描时间。

由于(7)式表述的函数  $J_i(T)$  具有峰值, 我们用极值条件  $\frac{dJ_i}{dT} \Big|_{T_m} = 0$ , 得到

$$\frac{S k T_m^2}{\alpha(E_0 - \beta\sqrt{F})} = \exp\left(\frac{E_0 - \beta\sqrt{F}}{k T_m}\right), \quad (9)$$

类似的函数关系曾在文献[3]中讨论过。在我们感兴趣的温度范围内 (300—500K),  $(E_0 - \beta\sqrt{F})$  与  $T_m$  之间有好的线性关系。于是,(9)式可以近似表述为:

$$E_0 - \beta\sqrt{F} = a T_m + b \quad (10)$$

其中,  $a$ 、 $b$  为常数。

取  $\alpha = 1.4 \text{ ksec}^{-1}$  (我们的实验条件), 用(9)式计算  $(E_0 - \beta\sqrt{F})$  与  $T_m$  之间的函数关系, 其结果由图 2 所示。由图 2 我们得到

$$a \approx 2.6 \times 10^{-3} \text{ eV/K}$$

$$b \approx -0.03 \text{ eV}$$

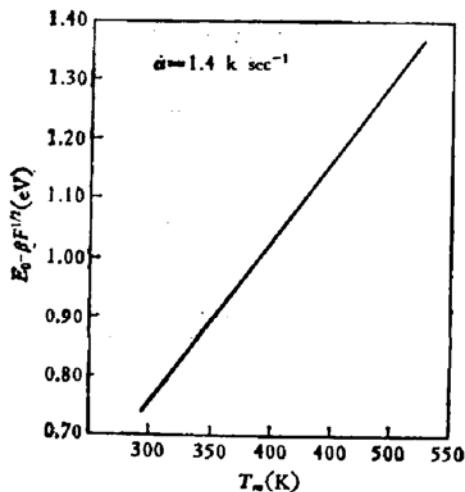


图 2 TSIC 峰位温度与电场强度的关系

由图 2 可以看到, 即使可动离子的界面陷阱很深, 例如  $E_0 = 1 \text{ eV}$ , 只要外加电场够强使之  $\beta\sqrt{F} > 0.2 \text{ eV}$ , 那么, 在常温或比常温稍高的温度下也可能观察到可动离子的迁移现象。

### 三、实验与结果

#### 1. 样品

P型硅单晶片, 电阻率为  $8\text{--}10 \Omega \text{cm}$ 。用常规的干湿氧工艺生长二氧化硅, 厚度  $\sim 5000 \text{ \AA}$ , 金属圆点的直径为 1mm, MOS 单管在  $N_2\text{-H}_2$  中退火:  $380^\circ\text{C}, 30$  分钟。

## 2. 实验与结果

用 TSIC 法测量了偏置电压为 0.1, 0.4, 0.9, 1.0, 4.0, 9.0, 16 伏时的 TSIC 曲线, 由各曲线的峰位温度  $T_m$  得到相应的  $E_e$  值。

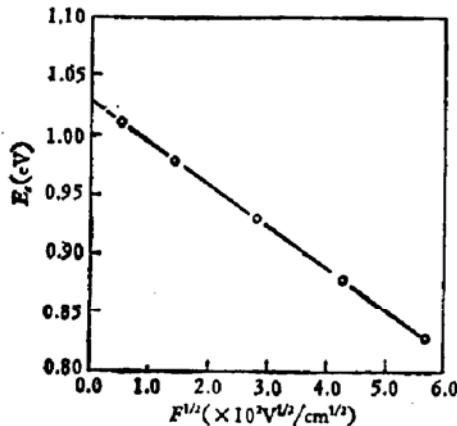


图 3 有效陷阱深度与电场强度的关系

图 3 给出了 Al-SiO<sub>2</sub>-Si 系统, Si-SiO<sub>2</sub> 界面陷阱的  $E_e - \sqrt{F}$  图。实验结果表明,  $E_e$  与  $\sqrt{F}$  之间有线性关系, 并可定量描述为:

$$E_e = 1.03 - 3.7 \times 10^{-4} \sqrt{F},$$

与(5)式比较, 得到,

$$E_0 = 1.03 \text{ eV},$$

$$\beta = 3.7 \times 10^{-4} \text{ eV} \left( \frac{\text{cm}}{\text{V}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

对于 Au-SiO<sub>2</sub>-Si 系统, Au-SiO<sub>2</sub> 界面, 得到类似的结果:

$$E_e = 1.45 - 3.9 \times 10^{-4} \sqrt{F},$$

$$E_0 = 1.45 \text{ eV}$$

$$\beta = 3.9 \times 10^{-4} \text{ eV} \left( \frac{\text{cm}}{\text{V}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

在实验误差范围内 (温度测量误差小于  $\pm 1\%$ , 电场测量误差小于  $\pm 0.5\%$ ), 由实验得到的  $\beta$  值与(4)式计算的结果  $3.86 \times 10^{-4} \text{ eV} \left( \frac{\text{cm}}{\text{V}} \right)^{\frac{1}{2}}$  相符。

## 四、讨论与结论

本文讨论了 SiO<sub>2</sub> 中可动离子 (主要是 Na<sup>+</sup>) 的跃迁机理。认为: 在 TSIC 测量中, 可动离子跃迁出界面陷阱的过程是热激发和场增强发射的双重作用结果, 并由实验得到了证实。因此, 用 TSIC 法测定可动离子的最可几陷阱深度, 必须做场增强发射效应的修正。当可动离子具有能量分布时, 这种修正更为重要。

关于“场激发可动离子电流”测量方法, 将在另一文中讨论。

本文承蒙王阳元、莫党 (中山大学)、韩汝琦、但森 (科学院电子所)、张利春、吉力久、李树栋 (八七八厂) 等同志参加讨论并提出不少有益的建议。李湘琳、陈文茹、梁海维等同志在测量中给予大力协助, 作者在此表示谢意。

### 参 考 文 献

- [1] J. T. Randall and M. H. F. Wilkins, *Proc. Roy. Soc.*, **184A**, 390 (1945).
- [2] I. J. Saunders and R. H. Jewitt, Annual Report on Research Project R7-27, Thin Film Circuit Element, Document AD 480752, National Technical (1965).
- [3] J. G. Simmons, G. W. Taylor and M. C. Tam, *Phys. Rev.* **B7**, 3714 (1973).
- [4] T. W. Hickmott, *J. Appl. Phys.*, **46**, 2583 (1975).
- [5] M. R. Boudry and J. P. Stagg, *J. Appl. Phys.*, **50**, 942 (1979).
- [6] 郑有料、江若琏,南京大学学报(物理学专刊),No. 1 (1980).
- [7] Ji Lijiu, Wang Yangyuan, Zhang Lichun, and Ni Xaiewin, Presented at International Conference on the Physics of MOS Insulators, Raleigh, NC, U. S. A., 18—20, (1980).
- [8] 王阳元、张利春、吉力久,倪学文,半导体学报, **3**, 245 (1982).
- [9] J. M. Eldridge and D. R. Kerr, *J. Electrochem. Soc.*, **118**, 958 (1971).
- [10] J. Frenkel, *Phys. Rev.*, **54**, 647 (1938).
- [11] M. Lax, *Phys. Rev.*, **119**, 1502 (1960).

### Effect of Applied Electric Field on TSIC Measurement

Tan Changhua and Xu Mingzhen

*(Peking University)*

#### Abstract

The dependence of the peak-positions of TSIC curves on an applied electric field has been investigated by Field-assisted Thermally Stimulated Interface trapping model. The analytical results show that the most probable trapping energy depths of mobile ions determined by TSIC are the effective energy  $E_e$ . Poole-Frenkel effect is invoked to explain how the effective energy  $E_e$  is affected by an applied electric field. For determination of the true trapping energy depths of mobile ions, the experimental results must be corrected. The corrected amount  $\Delta E$  is a Poole-Frenkel lowering amount which is about 0.386 eV at an applied electric field of  $10^6$  V/cm.