

# 电场调制效应对氧化层电流弛豫谱的影响

许铭真 谭长华 刘晓卫 王阳元

(北京大学计算机科学技术系,北京,100871)

1990年7月4日收到,9月23日定稿

本文用单陷阱电荷俘获模型研究了电场调制效应对氧化层电流弛豫谱(Oxide Current Relaxation Spectroscopy)——简称 OCRS 的影响。给出了精确的 OCRS 谱函数及其各级近似表述式;给出了确定陷阱参数(俘获截面,荷心及面密度)的精确公式及各类简化式;给出了各类近似成立的直观实验判据式。对实验结果进行了电场修正,得到了更为满意的结果。

## 一、引言

VLSI/ULSI 器件、电路的可靠性、稳定性与绝缘层中的陷阱电荷状态密切相关。在 ULSI 时代,栅绝缘层厚度 $\leq 200\text{\AA}$ ,高场应用过程中的新生陷阱电荷对器件性能产生显著的影响,为此,人们对陷阱电荷的动力学过程及其性质进行了广泛的研究<sup>[1-4]</sup>。陷阱电荷的电学特性可用三个基本参数:俘获截面、荷心及面密度来表征。目前,对于多陷阱并存情况下的各陷阱参数的测定,国际上流行的方法是拟合法<sup>[5,6]</sup>(fitting method)。这种方法是采用试拟函数的办法,通过与实验结果的反复拟合、比较,外推得到试拟参量。它有以下缺点:1. 精度低。拟合法提取陷阱参量的精度决定于实验数据的可取范围,对于试拟指数函数而言,其变量(电子流密度或时间)与特征参数(俘获截面或时间常数)的乘积应远大于1,而对于新生陷阱,此值接近于1。所以,拟合参量数据分散度较大。2. 周期长。拟合法需将试拟函数的三个参量(俘获截面、密度、荷心)进行反复调配,以求拟合完整的实验曲线,所以拟合工作量相当可观。拟合双陷阱效应费时为单陷阱的几倍,而拟合三种陷阱效应费时为单陷阱的几十倍。3. 分辨率低。拟合法是一种无谱峰特征的技术,故难以对多种陷阱进行分离与检测。4. 拟合法是一种间接测量技术,故不能同时、直接给出各陷阱的三个重要参量。鉴于上述困难,我们提出了 OCRS 方法<sup>[7]</sup>。用单陷阱模型来研究多陷阱现象已应用于半导体深能级陷阱<sup>[8]</sup>及可动离子陷阱<sup>[9,10]</sup>的研究中,只要陷阱间的关键识别参数差异较大,其行为将如同多个单陷阱一样。OCRS 方法是一种利用单陷阱模型及实流差值取样技术的谱峰技术,它的最大特点是:1. 易于识别原生与新生等多种陷阱电荷,并便于物理图像的解释;2. 能方便地直接确定各陷阱的俘获截面;3. 能同时给出各陷阱的三个基本参数;4. 是一种谱峰技术,灵敏度、分辨率高,数据处理方便省时;5. 是一种最接近于实际工作条件、易于实现自动化的在线检测技术。

文[7]限于篇幅仅讨论了场因子的零级近似与应用,对 OCRS 未作精细分析。本文

将在更为普遍的物理基础上对影响 OCRS 的各种电场效应作进一步的分析与研究。有关多陷阱“相干作用”的影响将另文详细讨论。

## 二、基本关系式

### 1. OCRS 原理简介

(1) 恒定电压状态下的 MOS 结构隧道穿透电流与阴极注入电场的关系

对于  $\text{SiO}_2$ ，其隧道穿透电流可用众所周知的 Fowler-Nordheim 场发射电流关系式描述：

$$J = AE_0^2 \exp(-B/E_0) \quad (1)$$

其中， $A$ 、 $B$  为常数，仅与电子有效质量以及注入阴极势垒高度有关； $E_0$  为  $\text{SiO}_2$  的电子注入端(阴极)之电场强度。当  $\text{SiO}_2$  中存在陷阱时，注入  $\text{SiO}_2$  的载流子将被陷阱所俘获，从而引起  $\text{SiO}_2$  内部电场的变化。设阴极电场变化量为  $\pm \Delta E_c$  (+号表示电场增强，一号表示电场减弱)，考虑了阴极注入端电场变化的 F-N 电流应表示为：

$$J(E_c) = AE_0^2 \left(1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0}\right)^2 \exp\left[-\frac{B}{E_0 \left(1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0}\right)}\right] \quad (2)$$

其中， $E_0$  为陷阱尚未被载流子填充时的阴极初始电场强度。

将(2)式写为对数形式：

$$\ln(J/J_0) = 2 \ln \left(1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0}\right) \pm \frac{B}{E_0} \frac{\Delta E_c/E_0}{\left(1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0}\right)} \quad (3)$$

其中， $J_0 = AE_0^2 \exp(-B/E_0)$ ，为初始电流密度。

(2) 阴极电场变化量随注入电子流量密度的弛豫关系

设  $\text{SiO}_2$  中某陷阱密度  $N_t$ ，俘获截面  $\sigma$ ，隧道穿透电流  $J$ 。在恒定栅电压的条件下， $J$  是时间  $t$  的弛豫函数，陷阱电荷密度的时变关系为：

$$N_t(t) = N_{0t} \left[1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{\sigma J(t)}{q} dt\right)\right] \quad (4)$$

据高斯定理，陷阱电荷引起的阴极电场相对变化量为：

$$\frac{\Delta E_c(F)}{E_0} = H[1 - \exp(-\langle \sigma \rangle F)] \quad (5)$$

其中，

$$\langle \sigma \rangle = \int_0^t \sigma J(t) dt / (Fq) \quad (6)$$

为陷阱平均俘获截面，

$$F = \frac{1}{q} \int_0^t J(t) dt \quad (7)$$

为电子流密度，

$$H = \left| \frac{qN_{ot}X}{\epsilon_0\epsilon_i E_0 T_i} \right| \quad (8)$$

其中,  $\epsilon_0, \epsilon_i$  分别为真空及  $\text{SiO}_2$  的介电常数,  $T_i$  是  $\text{SiO}_2$  厚度,  $X$  为陷阱面电荷的平均位置(荷心), 定义为距  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面的距离,  $N_{ot}$  为陷阱电荷饱和值。我们称  $H$  为电场因子,  $+H$  对应于正的陷阱电荷,  $-H$  对应于负的陷阱电荷。

### (3) OCRS 取样函数

定义取样函数  $S$  为隧道电流的对数值在两个电子流密度  $F_1$  和  $F_2$  之间的有限差分, 即

$$S = \ln[J(F_2)/J(F_1)] \quad (9)$$

其中,  $F_2 = KF_1$ ,  $K$  为差值取样数且  $K = 1 + \xi$  ( $\xi \ll 1$ )。

于是, (3) 式的差值取样函数为

$$S = 2 \ln \left[ \frac{D(y)}{C(y)} \right] \pm RH \left\{ \frac{1 - e^{-Ky}}{D(y)} - \frac{1 - e^{-y}}{C(y)} \right\} \quad (10)$$

其中,

$$D(y) = 1 \pm H(1 - e^{-Ky}) \quad (11)$$

$$C(y) = 1 \pm H(1 - e^{-y}) \quad (12)$$

$$R = B/E_0, \quad y = \langle \sigma \rangle F \quad (13)$$

将(3)式取零级、一级及二级近似(详见附录), 其取样函数分别为:

$$S_0 = \pm RH(e^{-y} - e^{-Ky}) \quad (14)$$

$$S_1 = \pm(R + 2)H(e^{-y} - e^{-Ky}) \quad (15)$$

$$S_2 = \pm(R + 2)H(e^{-y} - e^{-Ky}) - (1 + R)H^2[(1 - e^{-Ky})^2 - (1 - e^{-y})^2] \quad (16)$$

我们称  $S_0, S_1$  和  $S_2$  为零级、一级和二级场因子近似取样函数。图 1 给出  $H=0.1, K=1.01, R=24.5$  时计算的  $S, S_0, S_1, S_2$  与  $\langle \sigma \rangle F$  的关系曲线。图 1(a) 中的一组曲线对应于 (10)~(16) 式中的  $+H$ , 即正的陷阱电荷, 而图 1(b) 中的一组曲线对应于  $-H$ , 即负的陷阱电荷。图 1 说明: 各级场因子近似取样函数与  $S$  相比,  $S_2$  函数与  $S$  函数的峰高、峰位接近, 而  $S_0, S_1$  与  $S$  比较其峰高、峰位的差别稍大, 且与陷阱电荷的极性相关。

### (4) OCRS 取样函数的谱峰特性

不难看出, (10) 式是一种具有极值的函数, 因此, 用  $\left. \frac{\partial S}{\partial F} \right|_{F=F_m} = 0$ , 可以得到:

$$Y_m = \langle \sigma \rangle F_m = \frac{\ln K_r}{K - 1} \quad (17)$$

其中,

$$\begin{aligned} \ln K_r = & \ln K + 2 \ln \left[ \frac{1 \pm H(1 - e^{-\langle \sigma \rangle F_m})}{1 \pm H(1 - e^{-K \langle \sigma \rangle F_m})} \right] \\ & + \ln \left\{ \frac{1 \pm 2R[1 \pm H(1 - e^{-K \langle \sigma \rangle F_m})]}{1 \pm 2R[1 \pm H(1 - e^{-\langle \sigma \rangle F_m})]} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

用(17)和(10)式, 得到  $S$  函数的峰值高度

$$S(F_m) = 2 \ln \left[ \frac{1 \pm H(1 - K_r^{\frac{K}{1-K}})}{1 \pm H(1 - K_r^{\frac{1}{1-K}})} \right] \pm RH \left[ \frac{1 - K_r^{\frac{K}{1-K}}}{1 \pm H(1 - K_r^{\frac{K}{1-K}})} - \frac{1 - K_r^{\frac{1}{1-K}}}{1 \pm H(1 - K_r^{\frac{1}{1-K}})} \right] \quad (19)$$

取样函数的这种谱峰特征给介质层陷阱电荷效应的定量分析带来了极大的方便。特别是在多种陷阱电荷并存的情况下,更是如此。从原理上来讲,采用迭代法确定  $K_r$  值,将

OCRS 谱上的实验数据  $F_m$  与  $S(F_m)$  代入上式就可以确定  $\langle \sigma \rangle$  与  $H$  值. 并采用正,负栅压隧道注入模式,可得到  $N_{ot}$  与  $X$  的分离. 但是,从(17)–(19)式可以看到,弛豫取样函数是一种复杂的超越函数形式. 隧道电流表述式中的电场平方因子[(18)式中的第二项,(19)式中的第一项],电场幂因子[(18)式中的第三项,(19)式中的第二,三项],对 OCRS 的分析结果都会产生影响.

显然,为了物理诠释上的直观与测试分析上的简便,在保证所需精度的前提下,应作相应的近似与简化才适合于实际应用.

(5) 陷阱参数的确定方法及相关近似关系式

(i) 关于平均俘获截面  $\langle \sigma \rangle$  的确定

类似于(10)式,(14)–(16)式也是具有极值的函数,设  $F_{m,0}$ ,  $F_{m,1}$  和  $F_{m,2}$  分别为零级,一级和二级取样函数峰位,用其极值条件,可得相应的平均俘获截面近似解为:

零级与一级近似解:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\ln K}{(K - 1)F_{m,0}} = \frac{\ln K}{(K - 1)F_{m,1}} \quad (20)$$

二级近似解:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\ln K_2}{(K - 1)F_{m,2}} \quad (21)$$

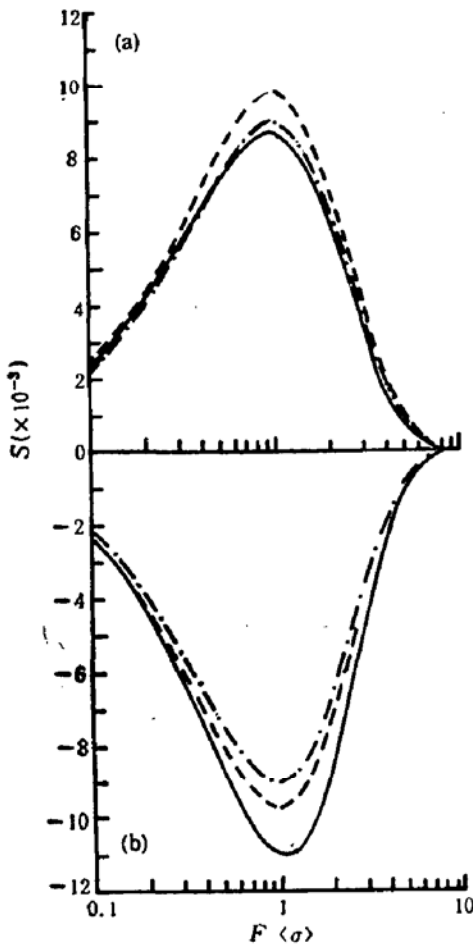


图1 各级 OCRS 取样函数曲线  
—— $S, S_1$ , --- $S_2$ , ··· $S_0$

其中,

$$K_2 = K + \frac{1}{1 \mp \frac{2+R}{2(1+R)H}} K_2^{\frac{K}{1-K}} [K_2^2 - K] \quad (22)$$

式中,“-”、“+”号分别对应于正、负陷阱电荷.

因此,用 OCRS 谱峰位,便可以方便地确定  $\langle \sigma \rangle$ .

(ii) 关于陷阱电荷面密度  $N_{ot}$  与平均荷心  $\bar{X}$  的确定

由(5)式,栅极注入隧道电流引起的注入电极电场的相对变化量为:

$$\Delta E_{gm}/E_0 = \frac{qN_{0r}x}{\epsilon_0\epsilon_i E_0 T_i} (1 - e^{-\omega F}) \quad (23)$$

类似, 衬底注入引起的注入电极电场的相对变化量可以写为:

$$\Delta E_{gr}/E_0 = \frac{qN_{0r}(T_i - X)}{\epsilon_0\epsilon_i E_0 T_i} (1 - e^{-\omega F}) \quad (24)$$

(23)与(24)式为未知数  $N_{0r}$  及  $x$  的联立方程组, 其解为:

$$\bar{X} = X/T_i = \frac{\Delta E_{gm}/\Delta E_{gr}}{1 + \Delta E_{gm}/\Delta E_{gr}} \quad (25)$$

$$N_{0r} = \frac{\epsilon_0\epsilon_i E_0}{q} \left( \frac{\Delta E_{gm}}{E_0} + \frac{\Delta E_{gr}}{E_0} \right) (1 - e^{-\omega F})^{-1} \quad (26)$$

将相应的近似项代入, 则可得

零级近似

$$\bar{X} = \left( 1 + \frac{|S_{gr}|}{|S_{gm}|} \right)^{-1} \quad (27)$$

$$N_{0r} = \frac{E_0\epsilon_0\epsilon_i}{Rq\bar{K}} (|S_{gm}| + |S_{gr}|) \quad (28)$$

一级近似:

$$\bar{X} = \left( 1 + \frac{|S_{gr}|}{|S_{gm}|} \right)^{-1} \quad (29)$$

$$N_{0r} = \frac{E_0\epsilon_0\epsilon_i}{(R+2)q\bar{K}} (|S_{gm}| + |S_{gr}|) \quad (30)$$

其中,  $S_{gm}$ ,  $S_{gr}$  分别为栅, 衬底注入时的 OCRS 峰高;  $\bar{K} = K^{\frac{1}{1-K}}(K-1)$  (31)

二级近似

$$\bar{X} = \frac{1 - \sqrt{1 - aS_{gm}}}{2 - \sqrt{1 - aS_{gm}} - \sqrt{1 - aS_{gr}}} \quad (32)$$

$$N_{0r} = \frac{\epsilon_0\epsilon_i E_0}{qb} (2 - \sqrt{1 - aS_{gm}} - \sqrt{1 - aS_{gr}}) \quad (33)$$

式中,

$$a = \frac{4(R+1)[2\bar{K}_2 + K_2^{\frac{1}{1-K}}(K_2^{-2} - 1)]}{(2+R)^2\bar{K}_2^2} \quad (34)$$

$$b = \frac{2(R+1)[2\bar{K}_2 + K_2^{\frac{1}{1-K}}(K_2^{-2} - 1)]}{(2+R)\bar{K}_2} \quad (35)$$

其中,

$$\bar{K}_2 = K_2^{\frac{1}{1-K}}(K_2 - 1) \quad (36)$$

这样, 利用上述各式, 根据不同的条件与要求, 则可进行陷阱参数的定量分析。

## 2. 电场因子对 OCRS 的影响

电场因子的影响直接反映在  $H$  对峰高  $S(F_m)$  及峰位  $F_m$  的影响上。图 2 和图 3 分别

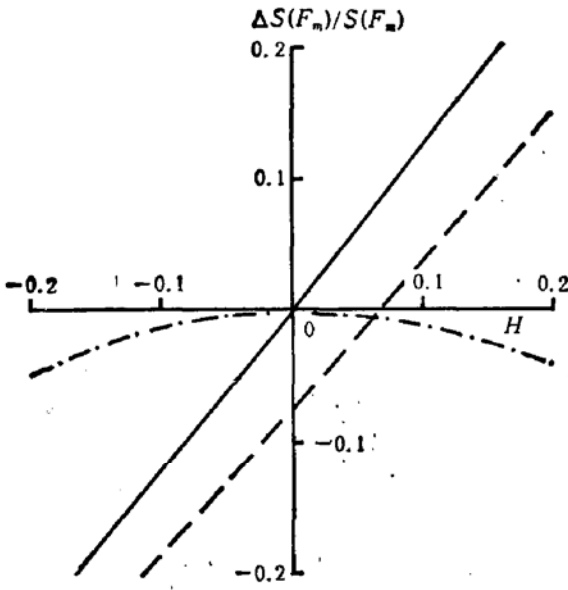


图 2  $\frac{\Delta S(F_m)}{S(F_m)}$  vs  $H$  曲线

—  $\frac{\Delta S_0}{S}$     - -  $\frac{\Delta S_1}{S}$     - · -  $\frac{\Delta S_2}{S}$

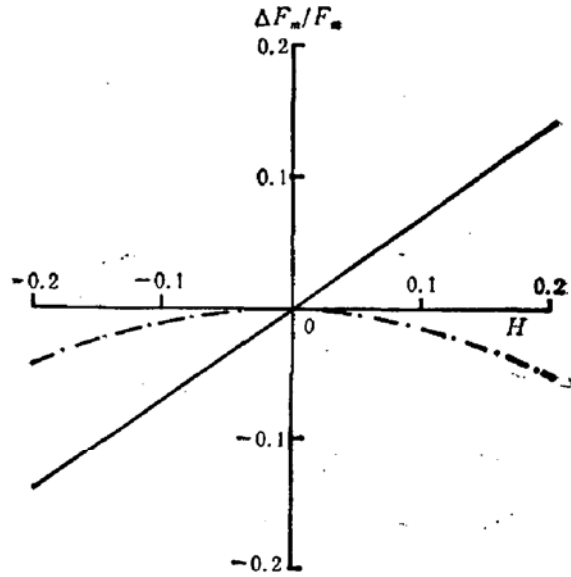


图 3  $\frac{\Delta F_m}{F_m}$  vs  $H$  曲线

—  $\frac{\Delta F_{m0}}{F_m}$  及  $\frac{\Delta F_{m1}}{F_m}$     - · -  $\frac{\Delta F_{m2}}{F_m}$

给出了：在  $R = 24.5$ ,  $\xi = 10^{-3} \sim 10^{-1}$  的条件下，对于各级场因子近似函数计算得到的峰高，及峰位的相对偏差率  $\frac{\Delta S(F_m)}{S(F_m)}$  及  $\frac{\Delta F_m}{F_m}$  与  $H$  之间的关系曲线。

图 2 和图 3 说明：零级和一级场因子近似函数与精确函数比较，其 OCRS 峰高与峰位的相对偏差率与  $H$  之间有近似的线性关系，其斜率与陷阱电荷的极性有弱的关系。

### 3. 半导体表面电场对初始阴极电场 $E_0$ 的调制效应

实验中发现，在同样的栅电压幅值的条件下，F-N 电流的变化幅值与隧道电子的注入极性相关，即从衬底注入时，其电流比从栅上注入时大些。其主要原因是由于所采用的样品为  $MS^+OS$  结构， $S^+$  为 N 型重掺杂多晶硅栅， $S$  为硅衬底 (N-Si,  $6 \sim 8 \Omega \text{cm}$ )。当电子从衬底注入  $\text{SiO}_2$  时，在多晶硅反型层上产生的电压降要比栅注入时衬底硅表面反型层上产生的电压降小得多，因而  $\text{SiO}_2$  上的分压前者略高，尽管其差仅有 5%，但是对 F-N 电流的影响却很大。因此，当注入极性改变时，相等幅值的栅电压并不等于  $\text{SiO}_2$  的阴极注入端的初始电场相等。

若施加电压的初始，MOS 电容器的质量是理想的，即  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面陷阱、 $\text{SiO}_2$  体内陷阱，可动离子的影响均可忽略，这时须考虑功函数差的影响。根据电压守恒原则，MOS 栅电压为

$$V_g = V_m + T_i E_i(\phi_s) + \phi_s \tag{37}$$

其中， $\phi_s$  为半导体表面势； $E_i(\phi_s)$  是氧化层内的平均电场强度，它可用下式表述：

$$E_i(\phi_s) = \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_i} \right) \frac{\sqrt{2}}{L_D} \frac{KT}{q} F \left[ \phi_s, \frac{n_i^2}{N_d^2} \right] \tag{38}$$

其中， $\epsilon_s$  为半导体的介电常数， $L_D$  为非本征德拜长度， $F \left[ \phi_s, \frac{n_i^2}{N_d^2} \right]$  为归一化电场强度函

数<sup>[11]</sup>.

$$L_D = \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_r K T}{q^2 N_d} \right)^{1/2} \quad (39)$$

$$F \left[ \phi_s, \frac{n_i^2}{N_d^2} \right] = \pm \left[ \left( \frac{n_i}{N_d} \right)^2 \left( e^{-\frac{q\phi_s}{KT}} + \frac{q\phi_s}{KT} - 1 \right) + \left( e^{\frac{q\phi_s}{KT}} - \frac{q\phi_s}{KT} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (40)$$

( $\phi_s > 0$  时, 用+号;  $\phi_s < 0$  时, 用-号).

对于我们的实验样品 ( $N_d = 2.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ), 计算出氧化层电场强度  $E_i(\phi_s)$  与栅电压  $V_g$  的关系曲线如图 4 所示. 图 4 也给出了  $V_g/T_i$  vs  $V_g$  线.

#### 4. 器件退化判据——OCRS 谱峰电流与电场的关系

$\text{SiO}_2$  隧道电流是阴极电场的灵敏函数. 因此,  $\text{SiO}_2$  中的陷阱电荷状态变化将极敏感地被隧道电流显示出来. 电流相对变化量的大小将反映陷阱电荷密度的多少; 电流相对变化量的增或减将决定于陷阱电荷的种类; 其时序现象将反映多种陷阱电荷的俘获与产生规律. 因此, 由表观电流求得的阴极电场变化量将提供器件退化的重要信息. 此外, 阴极电场的相对变化量也是 OCRS 方法近似条件的理论判据.

利用(3)式, 已知电场  $\Delta E_c$ , 则可方便地得到电流密度  $J$ . 然而其逆运算只能采取费时的反复迭代逼近法. 考虑到实际测量的  $I-t$  曲线的精度, 可以用二级场因子近似函数来描述实验曲线. 由此可用(3)式得到简化的求解阴极电场变化量的表达式:

$$\frac{\Delta E_c}{E_0} \simeq \pm \frac{1}{2(1+R)} \left[ 2 + R - \sqrt{(2+R)^2 - 4(1+R) \ln(J/J_0)} \right] \quad (41)$$

式中“+”、“-”分别对应正、负陷阱电荷.

用(41)式, 可以方便地由电流  $J$  值确定相应的  $\Delta E_c$ , 从而为实验方法提供了定量分析的基础; (41)式亦可作为器件退化与 OCRS 谱的关键判据.

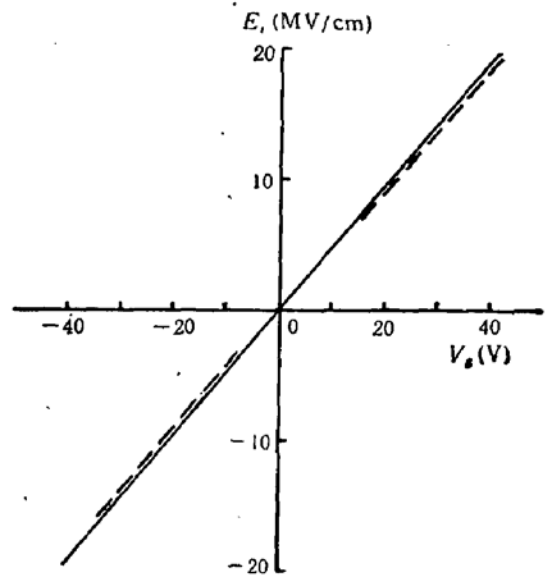


图 4 氧化层电场强度与栅电压的关系  
—— $V_g/T_i$  ——  $E_i(\phi_s)$

### 三、实验与结果

#### 1. 样品

N型 Si 单晶片,  $\langle 100 \rangle$  晶向, 电阻率为  $4 \Omega \text{cm}$ , Ar- $\text{O}_2$  热生长  $\text{SiO}_2$ , 厚度  $210 \text{\AA}$ .  $\text{N}^+$ -poly-Si 栅 MOS 电容器, 栅面积为  $1.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ .

#### 2. 测量装置

图 5 给出恒定电压高场隧道电流注入应力实验原理图.

运算放大器(K), 反馈电阻(R), 实验 MOS 电容器(C)组成电流计测量电路.  $V$  是

外加恒压电源,  $V_{out}$  (输出电压) 可用数字电压表计数, 它正比于隧道电流 ( $I_g$ ). 对  $I_g(t)$

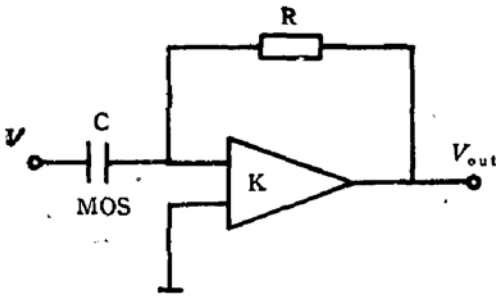


图 5 实验原理图

进行双通道处理, 一个通道实现  $I_g(t)$  的对数变换, 得到  $\ln[I_g(t)/I_g(0)]$ , 另一个通道进行  $I_g(t)$  的积分变换, 得到电子流密度  $F (= \frac{1}{qA} \int_0^t I(t) dt)$ , 这些转换可以用运算放大器实现, 也可以用计算机来完成. 图 6 给出恒压隧道电子注入条件下的隧道电流谱以及相应的取样谱. (a) 为衬底注入 (b) 为栅注入. a、b、c 对应于阴极初始电场分别为 11.7, 11.5, 10.9MV/cm.

用零级、一级近似关系式以及图 2, 3 给出的零级或一级场因子修正关系式, 从图 6 得到各陷阱电荷的参数, 其结果列在表 1 中.

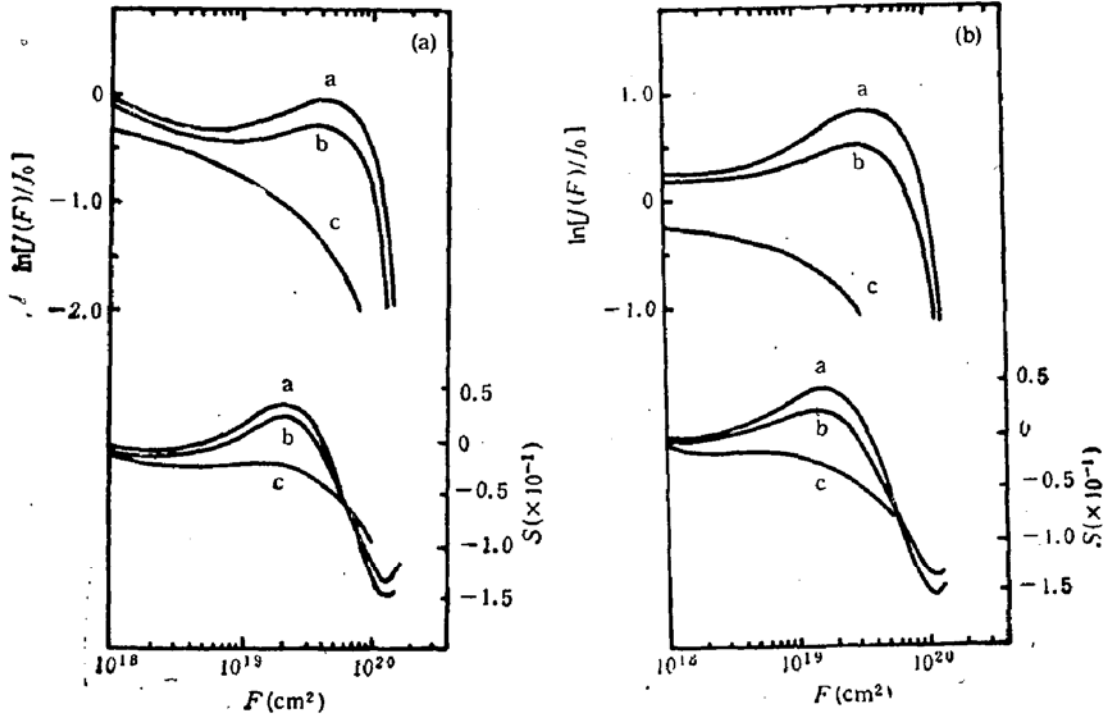


图 6 恒压隧道电流及取样谱

(a) 衬底注入 (b) 栅注入

a. 11.7MV/cm b. 11.5MV/cm c. 10.9MV/cm

表 1

	$N_{ot}$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	$N_o$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	$N_g$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	$\bar{X}_{ot}$	$\bar{X}_p$	$\bar{X}_g$	$\langle \sigma_{ot} \rangle$ ( $\text{cm}^2$ )	$\langle \sigma_p \rangle$ ( $\text{cm}^2$ )	$\langle \sigma_g \rangle$ ( $\text{cm}^2$ )
零级	$8.12 \times 10^{11}$	$2.22 \times 10^{11}$	$8.48 \times 10^{12}$	0.53	0.58	0.50	$1.2 \times 10^{-19}$	$4.4 \times 10^{-20}$	$7.6 \times 10^{-21}$
一级	$7.56 \times 10^{11}$	$2.05 \times 10^{12}$	$7.85 \times 10^{12}$	0.53	0.58	0.51	$1.2 \times 10^{-19}$	$4.4 \times 10^{-20}$	$7.6 \times 10^{-21}$
修正	$7.39 \times 10^{11}$	$2.17 \times 10^{12}$	$6.56 \times 10^{12}$	0.52	0.58	0.51	$1.2 \times 10^{-19}$	$4.3 \times 10^{-20}$	$8.9 \times 10^{-21}$



表 1 给出的数据是在  $E_0 = 11.7 \text{ MV/cm}$  的条件下的实验结果。其中,  $N_{0r}, \bar{X}_{0r}, \langle \sigma_{0r} \rangle$  是原生电子陷阱的密度、荷心、平均俘获截面;  $N_p, \bar{X}_p, \langle \sigma_p \rangle$  是新生正电荷的面密度、荷心、平均俘获截面;  $N_g, \bar{X}_g, \langle \sigma_g \rangle$  是新生电子陷阱的面密度、荷心、平均俘获截面。上述结果与文献[5]报道的: 铝栅 MOS 结构, 采用雪崩电子注入,  $\sigma_p \approx 8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ; 文献[6]报道的: 多晶硅栅 MOS 结构, 采用隧道电子注入(与本实验条件相似),  $\sigma_{0r}, \sigma_g$  在  $10^{-18} - 10^{-21} \text{ cm}^2$  范围内相近。由于新生陷阱的俘获截面与栅材料,  $\text{SiO}_2$  厚度, 应力条件有关, 要进行全面系统地比较, 有待于用 OCRS 方法做更进一步的研究工作。

#### 四、讨论与结论

我们先以图 7 为例, 对 OCRS 的特点做简要的讨论。

图 7 是氧化层中含有两种异极性陷阱电荷的 MOS 系统  $\ln[J(F)/J_0]$  vs  $\langle \sigma \rangle F$  及相应的  $S$  vs  $\langle \sigma \rangle F$  图。两种陷阱的俘获截面比为 10, 每种陷阱的  $S$  vs  $\langle \sigma \rangle F$  曲线由 (14) 或 (15) 式确定, 其中  $a_1$  表示负陷阱电荷,  $a_2$  表示正陷阱电荷。总的 OCRS 由两种陷阱的  $S$  vs  $\langle \sigma \rangle F$  特性迭加而成, 由曲线 b 表示。若取  $\xi (=K - 1) \ll 1$ , 则由 (20) 式得到  $\langle \sigma \rangle F_m \approx 1$ 。

首先, 由图 7 可以看到, OCRS 使氧化层陷阱电荷弛豫效应谱峰化, 每个谱峰代表一种固有的陷阱电荷效应, 峰高、峰位都有确切的物理含意, 峰的正、负则代表陷阱电荷的极性。因此, 无论是解释复杂的陷阱现象, 或提取物理参数都是方便的。

其次, OCRS 的峰位(电子流量密度  $F_m$ ) 与陷阱的关键识别参量  $\langle \sigma \rangle$  之间有简单的关系式, 即  $\langle \sigma \rangle F_m \approx 1$ , 而峰高对应于陷阱电荷的面密度及荷心。从而实现了各陷阱的三个参量的直接在线测量。极大地缩短了数据处理时间。

第三, OCRS 具有“电子流量密度速率窗口”的特殊功能, 只有满足  $\langle \sigma \rangle F_m = 1$  的陷阱电荷, 才能在  $F_m = \langle \sigma \rangle^{-1}$  处出现谱峰, 并被“窗口”择优识别。这说明 OCRS 方法在确定  $\langle \sigma \rangle, N_{0r}, \bar{x}$  的过程中, 无拟合法<sup>[5,6]</sup>的  $\langle \sigma \rangle \cdot F \gg 1$  的苛求, 从而大大减少了由此而引起的种种不确定性及参数分散度大的潜在因素, 提高了测试分析的可靠性与精度。

OCRS<sup>[7]</sup> 能直接确定薄栅绝缘层中的各种陷阱的动态参数——俘获截面或产生截面, 并能方便地应用“双极注入”方法分离出各种陷阱电荷的荷心及面密度的定量结果, 无疑对薄栅氧化层电导及击穿机制的研究将带来新的内容及研究结果。文[7]限于篇幅, 仅以单陷阱模型为基础给出了零级近似结果。本文在更为普遍的物理基础上对于影响

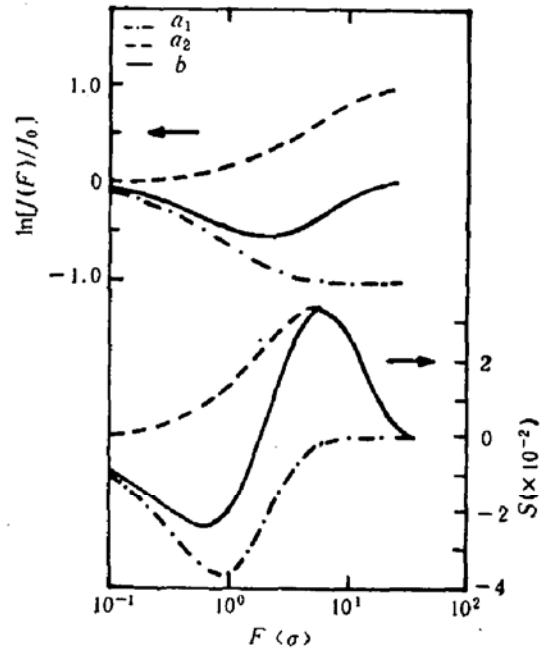


图 7 含双陷阱电荷的氧化层电流弛豫谱  
 $a_1$ : 负陷阱  $a_2$ : 正陷阱

OCRS 的各种电场调制效应进行了分析,分析结果表明: OCRS 取样函数是一种具有谱峰特征的普遍函数,不仅有文[7]中提出的零级场因子近似解,还有一、二级近似及数字精确解。

为了更确切地应用 OCRS 技术,本文用数值分析方法,在常用的测试电场区(8—12 MV/cm) 以及  $10^{-3} \leq \xi \leq 10^{-1}$  条件下,研究了 F-N 电流方程的零级、一级及二级场因子近似关系式及相关物理量 ( $E_0$  和  $\xi$ ) 对 OCRS 峰高,峰位以及它们与电场因子的关系的影响。分析与计算结果给出: 在  $E_0$  和  $\xi$  一定的条件下,在常有的电场因子( $H$ ) 的取值范围内,零级和一级场因子近似所引起的 OCRS 峰高、峰位的相对偏差率与场因子之间呈线性关系,其斜率与陷阱电荷的极性有弱的关系;在测试电场区(8—12MV/cm), 改变  $E_0$ ,其斜率分散度  $\leq 1\%$ ,在  $10^{-3} \leq \xi \leq 10^{-1}$  范围内, $\xi$  的取值对其斜率分散度的影响远小于  $E_0$  的影响。因此,在一般情况下,应用一级场因子近似,即可以得到较为满意的结果。如果采用一级(或零级)场因子修正关系式来处理 OCRS 数据,所得陷阱参数的误差将  $\leq 1\%$ 。

为了实现正、负栅隧道电流的对称注入模式,对半导体表面反型层电压的修正将使反型层对  $E_0$  的调制效应降低到最小。

退化判据的引入对于直观分析高场应力下的退化过程是有意义的。如图 6 所示,开始电流呈递减状,可视为负陷阱电荷在起主导作用,继而电流呈递增状,可视为正陷阱电荷所引起的,最后,电流又呈递减状且幅度远大于初始之递减量,可推测为新生负陷阱电荷所致。从总的电流变化量来看,阴极电场的变化量小于 20%。

本文的分析结果均可制成软件,以便于得到所需精度的各类数据。这在 CAT 测量中是容易实现的。因此,OCRS 是一种研究介质层陷阱的有用分析手段。

## 附 录

文中(3)式:

$$\ln(J/J_0) = 2 \ln \left( 1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0} \right) \pm \frac{B}{E_0} \frac{\Delta E_c/E_0}{\left( 1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0} \right)}$$

设  $R = B/E_0$ , 上式可写为:

$$\ln(J/J_0) = 2 \ln \left( 1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0} \right) \pm R \frac{\Delta E_c/E_0}{\left( 1 \pm \frac{\Delta E_c}{E_0} \right)} \quad (A1)$$

通常,  $\Delta E_c/E_0 < 1$ , (A1) 式对  $\Delta E_c/E_0$  作泰勒展开,取至二级近似,有

$$\ln(J/J_0) \approx \pm \left[ 2 \left( \frac{\Delta E_c}{E_0} \right) + R \left( \frac{\Delta E_c}{E_0} \right) \right] - (1+R) \left( \frac{\Delta E_c}{E_0} \right)^2 \quad (A2)$$

在常用的测试电场区 ( $E_0 = 8-12 \text{ MV/cm}$ ),  $R \approx 23-35$ 。我们定义:

(A1) 式的零级近似为:

$$\ln(J/J_0) = \pm R \frac{\Delta E_c}{E_0} \quad (A3)$$

(A1) 式的一级近似为:

$$\ln(J/J_0) = \pm (R+2) \frac{\Delta E_c}{E_0} \quad (A4)$$

(A1) 式的二级近似为:

$$\ln(J/J_0) = \pm(R+2) \frac{\Delta E_c}{E_0} - (R+1) \left(\frac{\Delta E_c}{E_0}\right)^2 \quad (\text{A5})$$

用文中(5)和(9)式,由(A3)—(A5)式容易导出文中(14)—(16)式所表述的零级,一级及二级取样函数。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] E. H. Nicollian & J. R. Brews, MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology, 1982.
- [ 2 ] 郑有焘、吴凤美,半导体学报,3,55(1982).
- [ 3 ] D. J. Dimaria, The Physics of SiO<sub>2</sub> and its interfaces proceeding of the international topical conference, 160(1978).
- [ 4 ] 郭维廉,硅-二氧化硅界面物理,第二版(1989).
- [ 5 ] C. T. Sah, J. Y. C. Sun and J. J. T. Tzou, *J. Appl. Phys.*, 54, 2547(1983).
- [ 6 ] C. F. Chen and C. Y. Wu, *J. Appl. Phys.*, 60, 3926(1986).
- [ 7 ] Mingzhen Xu, Changhua Tan and Yangyuan Wang, *J. Appl. Phys.*, 67, 6924(1990).
- [ 8 ] A. G. Milner, Deep Impurities in Semiconductors, Wiley (1973).
- [ 9 ] M. R. Boundry and J. D. Stagg, *J. Appl. Phys.*, 50, 942(1979).
- [ 10 ] Changhua Tan, Mingzhen Xu and Yangyuan Wang, *J. Appl. Phys.*, 54, 4398(1983).
- [ 11 ] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 1981, 2nd Edition.

## Effect of Electric Field Modulation on Oxide Current Relaxation Spectroscopy

Xu Mingzhen, Tan Changhua, Liu Xiaowei and Wang Yangyuan

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

### Abstract

The effect of electric field modulation on OCSR (Oxide current Relaxation Spectroscopy) has been studied based on single trap charge trapping model. The precise and approximate expressions of OCSR are presented. The precise formula and various approximate formulas have been given to determine the trap parameters (capture cross section, centroid, and density). Various approximate experiment discriminants have been obtained. The experimental results are corrected, and more satisfied results have been obtained.