

SiO₂ 中电子束辐照产生的电子陷阱

朱文珍 常秀勤 李月霞 安贵仁 宁华

(中国科学院半导体研究所)

1984年4月11日收到

一、引言

SiO₂ 中的陷阱在 MOS 短沟道器件的设计中是一重要限制，随着 MOS 集成电路集成度的提高，器件尺寸的缩小，必须考虑器件的热电子效应，SiO₂ 中陷阱的存在使热电子注入后器件性能发生变化，严重影响器件的稳定性、可靠性，另外电子束曝光、离子刻蚀、离子注入等工艺的采用，在 SiO₂ 中引入损伤，使这种效应更加严重，因此，对 SiO₂ 的陷阱特性，尤其是辐照产生的陷阱以及它的消除的研究是很重要的。

本文用内光电发射方法研究了 SiO₂ 中电子束辐照产生的电子陷阱，测量了 MOS 结构的光消光谱特性 PI-λ，光注特性 PI-t，以及平带电压随光注时间的变化，从而得到陷阱深度，有效陷阱密度，陷阱俘获截面，以及有效陷阱密度、陷阱俘获截面随偏压的变化。

二、测量方法和原理

内光电发射是利用氘灯光注入将 Si 价带电子激发到 SiO₂ 导带（栅加正偏压），克服了 Si-SiO₂ 界面势垒，在电场下扫入 SiO₂，被 SiO₂ 中的陷阱所俘获，在外电路形成电流，然后再用单色光将能量低于该波长光子能量的所有被俘获的电子激发出来，用单色光线性扫描，由长波扫至短波得到光消光谱特性。测量所用设备方块图如图 1 所示。

1200 条/mm 光栅单色仪光源为氘灯，光注入光源为氘灯。测量系统噪音低于 10^{-14} A。

实验样品是由 3—5 Q-cm〈100〉面的 n-Si 和 p-Si 片，湿氧化 $1\mu\text{m}$ 氧化硅，上面用钨丝蒸发 150—200 Å 的半透明铝电极，其面积为 $1.8 \times 6 \text{ mm}^2$ ，透射率为 60—70%，构成 MOS 电容。同一批样品中部分样品的氧化硅经电子束辐照，其能量为 15 keV，剂量为 10^{-4} C/cm^2 。

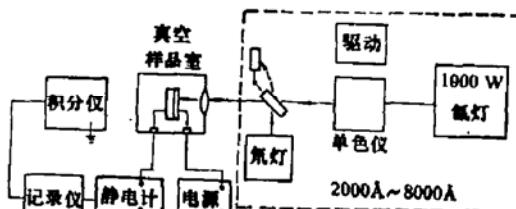


图 1 光导仪

三、实验结果

1. 注入特性：(光注入时光电流随时间变化)

光电流大小取决于光强、光子能量、界面势垒高度(包括外场和充电后引起的势垒降

落), 以及界面处散射情况^[1]。当光强、光子能量固定后, 光电流大小主要与外加偏压和由于陷阱充电引起的势垒降落有关。由于陷阱的俘获动力学是复杂的, 不仅与陷阱的俘获截面有关, 而且与高场下电子的碰撞离化、光离化去陷等因素有关, 因此光注入电流随时间的变化是复杂的^[2]。我们忽略了光离化和高场电子碰撞离化。

为了确定饱和注入条件, 测量了各种偏压下的注入特性。对未辐照样品光注 5—10 分钟, 光电流趋于稳定, 30—40 分钟达到饱和注入(平带电压不再变化)。对辐照样品光电流开始比较陡, 但达到稳定和饱和注入的时间较长, 在 1 小时以上。饱和注入条件下, 平带电压所确定的有效可填充陷阱密度 n_{eff} 随偏压变化。

$$\Delta V_{\text{FB}} = \frac{q\bar{x}}{C_{\text{ox}}} n_t, \quad n_{\text{eff}} = \frac{\bar{x}}{d_{\text{ox}}} n_t,$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{\Delta V_{\text{FB}} C_{\text{ox}}}{q}.$$

其中 ΔV_{FB} —平带电压漂移, C_{ox} —单位面积氧化层电容, d_{ox} —氧化层厚度, \bar{x} —电荷质心位置, n_t —填充电子数(单位面积)。随着偏压增加, 有效可填充的电子数逐渐增大。电场达到 $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 时开始趋于饱和, 然后又随电场增加有下降趋势。

2. 光消光谱特性

SiO_2 中在 $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 电场下(栅加正偏压)饱和注入, 然后固定光强, 在 9×10^5

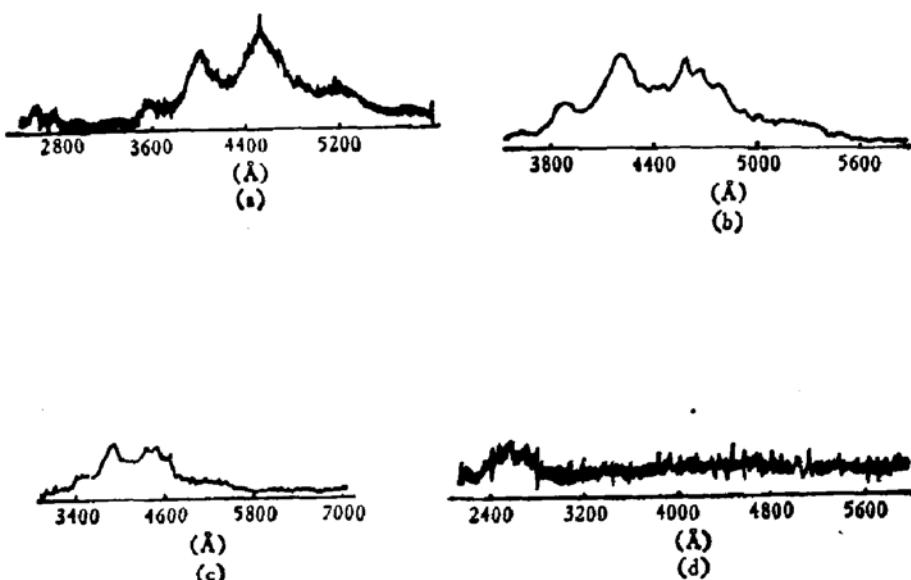


图 2 光消光谱

(a) 未辐照, 扫描速率 $\frac{d\lambda}{dt} = 66 \text{ Å/min}$

(b) 未辐照, 扫描速率 $\frac{d\lambda}{dt} = 510 \text{ Å/min}$

(c) 未辐照, 扫描速率 $\frac{d\lambda}{dt} = 440 \text{ Å/min}$

(d) 经辐照, 扫描速率 $\frac{d\lambda}{dt} = 66 \text{ Å/min}$

V/cm 外电场下光激发(栅上正偏压),以 66、440 和 510 $\text{\AA}/\text{min}$ 三种扫描速率使光从 7000 \AA 扫至 2000 \AA , 测量光电流随波长的变化, 典型曲线见图 2(a)(b)(c)(d)。

若忽略 SiO_2 中的吸收、散射, 只考虑狭缝宽度和铝膜透射率的影响对光源作修正, 得到量子产额谱曲线(见图 3)。

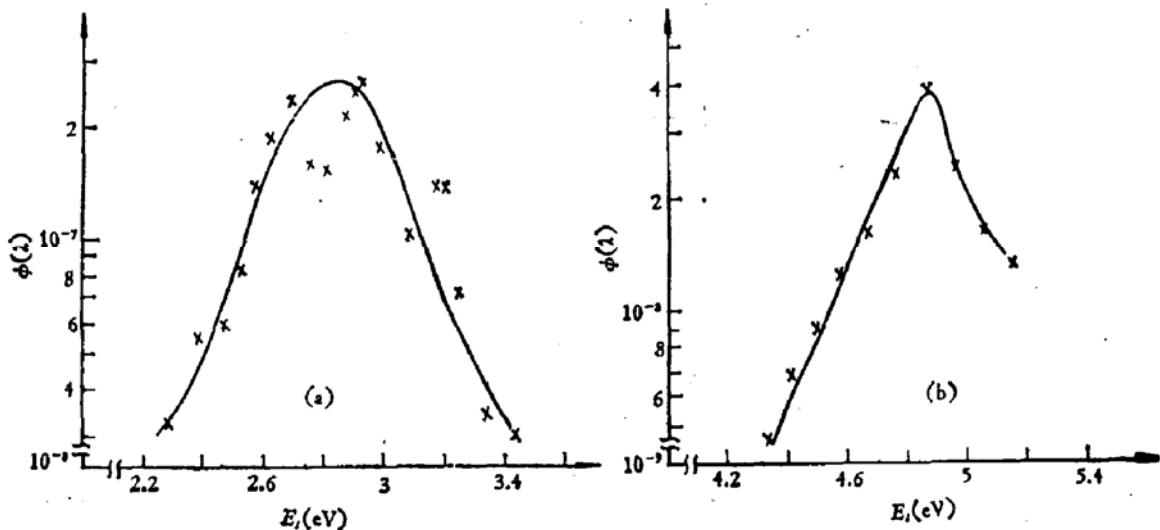


图 3 量子产额谱
(a) PN4(2.5) 510 $\text{\AA}/\text{min}$ (b) EBRF-18-PN6 66 $\text{\AA}/\text{min}$

$$\phi(\lambda) = \frac{I(\lambda)/qA_1}{S(\lambda)} \cdot \frac{60\%}{A_2}.$$

其中 $S(\lambda)$ 为光强, $I(\lambda)$ 为光消电流, A_1 为透明电极面积, A_2 为真空热电偶光照面积, q 为电子电荷。由图 3 得到陷阱能级在 SiO_2 禁带中位置如表 1。

表 1

样 品	扫描速率 ($\text{\AA}/\text{min}$)	陷阱深度 (eV)
PN4-C (3.1)	66	2.9 ± 0.1 4.75 ± 0.1
PN4 (1.5)	440	3 ± 0.1
PN4 (2.5)	510	2.9 ± 0.1
EBRF-18-PN6	66	4.85 ± 0.1

由于没有对 SiO_2 中光的干涉效应作修正, 因此量子产额谱有起伏, 若经修正可得光滑的钟形分布曲线。

湿氧化硅中存在 2.9 eV 电子陷阱, 经电子束辐照后消失, 而在 4.8 eV 处出现新的电子陷阱, 有些未辐照样品也观察到弱的 4.8 eV 峰, 经电子束辐照后这种陷阱明显增加。

3. 平带电压随光注入时间的漂移

根据 T. H. Ning 和 H. N. Yu 的俘获动力学模型^[3]得到

$$\frac{dn_t}{dt} = \frac{j_n(t)}{q} \sigma_n (N_t - n_t),$$

$$n_t(x, t) = N_t(x) \left[1 - \exp \left(-\frac{\sigma_n}{q} \int_0^t j_n(t) dt \right) \right].$$

假设在某一时间间隔中光注入电流恒定(一般2'-3'后光电流变化就很小)则

$$n_t(x, t) = N_t(x) \left[1 - \exp \left(-\frac{\sigma_n j_n t}{q} \right) \right]$$

$$= N_t(x) (1 - \exp^{-t/\tau}),$$

$$\sigma_n = \frac{q}{j_n \tau},$$

$$\Delta V_{FB} = \frac{q}{\epsilon_{ox}} \int_0^x x n_t(x, t) dx$$

$$= \frac{q}{\epsilon_{ox}} \bar{x} N_t (1 - e^{-t/\tau}),$$

$$\ln \frac{d\Delta V_{FB}}{dt} = \ln \frac{-1}{\tau} \frac{q}{\epsilon_{ox}} \bar{x} N_t - \frac{t}{\tau}.$$

其中 n_t 为单位面积填充的电子数; N_t 为单位面积陷阱密度; σ_n 为电子俘获截面; j_n 为注入光电流; ΔV_{FB} 为平带电压漂移; x 为离 Si-SiO₂ 界面距离; \bar{x} 为电荷质心位置; ϵ_{ox} 为 SiO₂ 介电常数。由 $\ln \frac{d\Delta V_{FB}}{dt} \sim t$ 曲线斜率得到 $-\frac{1}{\tau}$, 由此得到俘获截面, 由曲线截距得到 $-\frac{1}{\tau} \frac{q}{\epsilon_{ox}} \bar{x} N_t$, 由此得到有效陷阱密度 $N_{t,eff}$

$$N_{t,eff} = \frac{\bar{x}}{d_{ox}} N_t.$$

如果只有一种陷阱则 $\ln \frac{d\Delta V_{FB}}{dt} \sim t$ 关系为直线, 否则存在多种陷阱, 图 4 (a)(b)(c) 和图 5

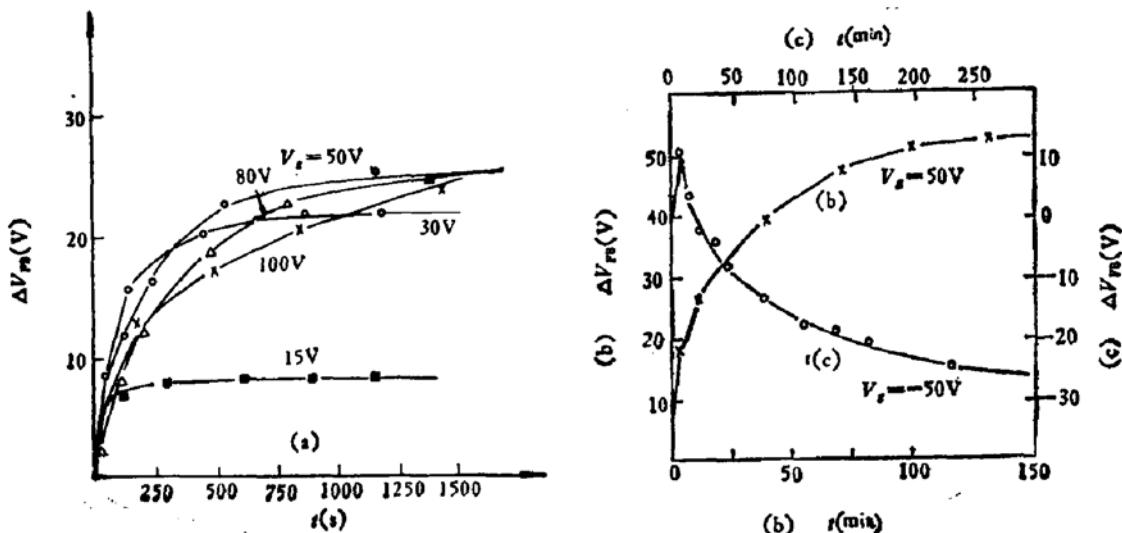


图 4 平带电压随光注时间变化
(a) PN-4 (未辐照) (b) (c) EBRF30-PP15 (经辐照)

表 4 样品 EBRF-30-PP15

参数	偏压	$V_g = +50V$	$V_g = -50V$
$\sigma_{n_1} (\text{cm}^2)$		2.47×10^{-13}	1.1×10^{-13}
σ_{n_2}		1.68×10^{-14}	8.6×10^{-14}
σ_{n_3}		1.33×10^{-14}	8.3×10^{-14}
$N_{\text{eff},1}$		3.58×10^{11}	1.31×10^{11}
$N_{\text{eff},2}$		5.08×10^{11}	1.81×10^{11}
$N_{\text{eff},3}$		8.81×10^{11}	1.13×10^{11}
$N_{\text{eff,总}}$		1.75×10^{12}	3.62×10^{11}

电场下), 表 4 给出 P 型辐照样品在正偏置和负偏置下电子陷阱俘获截面和有效陷阱密度的变化。

4. 根据 $C-V$ 测量经电子束辐照正电荷增加, 以一样品为例:

辐照前 $7.76 \times 10^{10} e/\text{cm}^2$,

辐照后 $2.35 \times 10^{11} e/\text{cm}^2$.

四、结 论

1. 湿氧化硅辐照前存在 2.9 eV 电子陷阱, 同时存在少量 4.8 eV 电子陷阱, 经电子束辐照后在 SiO_2 中感生出 4.8 eV 电子陷阱, 而 2.9 eV 电子陷阱消失了。

2. 经电子束辐照氧化硅中的正电荷中心, 电子陷阱都要增加, 以一样品为例辐照前有效氧化层电荷密度为 $7.76 \times 10^{10}/\text{cm}^2$, 辐照后增加到 $2.35 \times 10^{11}/\text{cm}^2$, 有效陷阱密度由 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 增加到 $(1.34-1.75) \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 。

3. 热生长的湿氧化硅中主要是俘获截面为 $(1-3) \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ 的库仑型电子陷阱, 而经电子束辐照后 SiO_2 中存在的主要的是 $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ 的中性陷阱, 同时存在 $(2-5) \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ 的库仑型电子陷阱。

4. 对于未经电子束辐照的氧化硅电子陷阱的俘获截面和有效陷阱密度对电场有较强的电场依赖关系, 在电场低于 $5 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 时俘获截面随电场增加而减小, 当电场高于 $5 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 时, 俘获截面随电场增加而趋于恒定, 而有效陷阱密度及有效可填充的陷阱密度(指光注入后根据高频 $C-V$ 测得的是已填充电子的陷阱密度)随电场增加而增大, 当电场高于 $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 时逐渐趋于饱和, 如果继续增加, 电场高于 $1 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 时, 俘获截面和有效陷阱密度有下降趋势。

五、讨 论

1. 热生长氧化硅中带正电的氧化层电荷的形成或是由于 SiO_2 中界面附近过剩硅的离化所致, 而离化辐照产生的正电中心是由于高能电子作用下在氧化硅中产生大量电子-空穴对, 因为电子在氧化硅中比空穴迁移得快, 因此, 空穴被氧化硅中陷阱所俘获形成带正电的氧化层电荷或者是由于氧化硅中一些施主中心受电子碰撞离化失去电子形成带正

电中心,如三价硅离化成 $\equiv \text{Si}^+$ 中心,致使氧化层电荷增加,这些俘获了空穴的正电中心就转变为俘获截面在 10^{-13} cm^2 的库仑吸引型电子陷阱,这就是为什么经电子束辐照后在正电荷中心增加的同时,库仑吸引型电子陷阱也有所增加,而2.9 eV的电子陷阱是与 SiO_2 中引入的Na和水相关的库仑吸引缺陷中心形成,经高能电子轰击后破坏而转化为受主型中性缺陷中心或者是正电中心。中性陷阱的形成可能与氧化硅中存在如非桥氧 $\equiv \text{Si}-\text{O}$ 这些受主型中性缺陷有关,在原生的 SiO_2 中也存在少量的 $\equiv \text{Si}-\text{O}$ 这一类中性缺陷中心,而经电子束辐照后键的断裂使这种缺陷增加造成中性陷阱增加。电子束辐照感生的4.8eV的电子陷阱就是由这种中性缺陷所造成。关于辐照产生这些电子陷阱的形成机理还是不清楚的,需要进一步探讨。

2. 对 SiO_2 中库仑吸引中心电子俘获截面对电场的依赖是较强的,这是由于外加电场增强时,引起界面势垒降低和电子加热效应,热电子能量增加引起俘获几率下降,势垒降低使注入电子增加引起俘获几率上升,当电场低于 $5 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 时电子加热效应起主导作用,电场加强时俘获截面下降,当外加电场高于 $5 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 低于 $1 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 时俘获截面达到一恒定值,如果再增加电场由于强场电子碰撞离化有可能引起俘获截面继续下降,电场低于 $1 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 时可以忽略场离化。

3. 有效陷阱密度及有效可填充的陷阱密度对电场的依赖同样是势垒降低和电子加热效应综合的结果。在强场时还必须考虑场离化效应,为了准确地测量电子陷阱密度,必须选择合适的电场强度,电场太小注入电子不足,影响电子的俘获有些陷阱测不到,电场太高引起场离化,因此一般选在饱和区。

4. 栅上加正偏压从 $\text{Si}-\text{SiO}_2$ 界面注入电子,负偏压下从 $\text{Al}-\text{SiO}_2$ 界面注入电子,电子俘获情况是有差异的,负偏压注入时观察到平带电压漂移反转,开始时俘获电子引入负电荷,平带电压向正电压方向漂移,注入4分钟后就出现正电荷,平带电压向负电压方向漂移,平带电压可以从-16.5V一直漂到-47.25V,这种反转现象在 $\text{Si}-\text{SiO}_2$ 界面注入时没有观察到,不同界面注入电子俘获情况的差异是由于二界面组分和组态差异造成, $\text{Si}-\text{SiO}_2$ 界面区存在许多过剩硅和三价硅中心,因此有可能形成更多的正电中心,当光注入时俘获电子引入负电荷,而 $\text{Al}-\text{SiO}_2$ 界面过剩硅和三价硅中心就较少而存在一些施主型慢态,另外p-Si正偏压下处于反型,因此同样50V下,负栅压时 SiO_2 中电场比正栅压时强,因此容易使 SiO_2 中中性陷阱及 $\text{Al}-\text{SiO}_2$ 界面施主型慢态光离化释放出电子,在界面和 SiO_2 内形成正电荷,引起平带电压漂移的反转。

MOS样品由本所四室402组及李淑英同志制备,样品电子束辐照由中国科学院电工研究所王理民等同志负责。另外我们的工作得到中国科学院上海冶金所王伟林、史常忻等同志的帮助,特在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. J. Powell and C. N. Berglund, *J. Appl. Phys.*, **42**, 4390. (1971).
- [2] D. S. Dimaria, F. J. Feigl and S. R. Butler, *Phys. Rev.*, **B11**, 5023 (1975).
- [3] T. H. Ning and H. N. Yn, *J. Appl. Phys.*, **45**, 5373 (1974).
- [4] D. M. Smyth, *Thermal and Photostimulated Currents in Insulators*.

Electron Trapping Induced by Electron Beam Irradiation in SiO₂

Zhu Wenzhen, Chang Xiuqin, Li Yuexia, An Guiren and Ning Hua
(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The electron trapping induced by electron beam irradiation in SiO₂ is investigated and the photodepopulation spectrum, the photojunction characteristics as well as the shift of flat-band voltage in response to photojunction are measured by use of internal photoemission technique. The depth of the trapping energy in the forbidden energy gap is given, together with capture cross section, effective trap density and the dependence of the capture cross section or the effective trap density on electric field.