

# 用光注入电流衰减测量绝缘膜中 陷阱的俘获截面

史常忻 顾为芳

(中国科学院上海冶金研究所)

1982年7月12日收到

## 提 要

MOS 结构中光注入时外电路电流特性与绝缘膜中陷阱俘获截面密切相关。本文给出了外电路电流的时间衰减关系。借此，可以方便地测量陷阱的俘获截面。该方法可以应用于非硅衬底的金属-绝缘膜-金属(MIM)结构中。

在 MOS 结构中，以适当能量的光照射样品，可以把电子注入到  $\text{SiO}_2$  中。R. Williams 首先观察到了这样的内光电发射电流<sup>[1]</sup>。继之，J. H. Thomas 和 F. J. Feigl 提出了光注、光消方法<sup>[2]</sup>，D. J. DiMaria 发展了光电流-电压法<sup>[3]</sup>，用来研究  $\text{SiO}_2$  薄膜中的电子陷阱。他们都可以测得薄膜中陷阱的密度和矩心。而陷阱的热俘获截面仍要由平带电压随时间的变化求出<sup>[4]</sup>。本文指出，当光注入时其外电路电流特性与绝缘膜中陷阱的俘获截面密切相关，并给出了外电路电流的时间关系。借此，可以方便地测量陷阱的俘获截面。

## 一、光 注 电 流

MOS 结构在正栅压下光注入电子时的能带图如图 1。图中  $V$  为外加电压(伏)， $N_t$  为  $\text{SiO}_2$  中的陷阱密度( $\text{厘米}^{-3}$ )， $n_t$  为被陷电子密度( $\text{厘米}^{-3}$ )。 $n_c$  为  $\text{SiO}_2$  导带中的电子密度( $\text{厘米}^{-3}$ )， $G$  为电子的光激发率( $\text{厘米}^{-3} \cdot \text{秒}^{-1}$ )， $d$  为  $\text{SiO}_2$  薄膜的厚度(厘米)， $E_M$  和  $E_F$  分别为金属和半导体的费米能级。

光激发至导带中的电子，一部分被陷阱俘获形成被陷空间电荷  $Q_t$ ，在外电路中感生电流  $J_1$ ，另一部分没有被俘获的电子，在电场的作用下流过绝缘膜形成外电路电流  $J_2$ 。它们可以分别表示为

$$J_1 = - \left(1 - \frac{\bar{x}}{d}\right) \frac{dQ_t}{dt} \quad (1)$$

和

$$J_2 = qvn_c \quad (2)$$

其中  $Q_t = q \int_0^d n_t \cdot dx$  为单位面积绝缘膜中被陷电荷数(库·厘米 $^{-2}$ )， $\bar{x} = \int_0^d x N_t dx /$

$\int_0^d N_t dx$  为电子陷阱密度的矩心(以金属-SiO<sub>2</sub>界面为零点),  $v$  为电子在 SiO<sub>2</sub>中的漂移速度(厘米·秒<sup>-1</sup>). 导带中的电子  $n_c$  和被陷电子  $n_t$  应满足方程

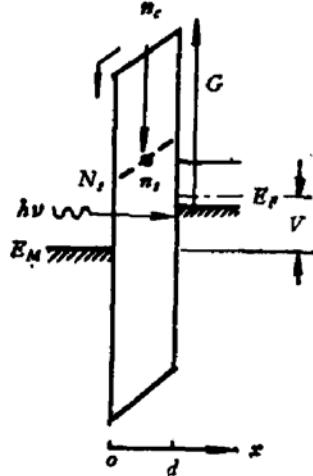


图1 正栅压光注入时的 MOS 结构

$$\frac{dn_t}{dt} = s \cdot n_c (N_t - n_t) \quad (3)$$

$$\frac{dn_c}{dt} = G - \frac{dn_t}{dt} - \frac{n_c}{\tau} \quad (4)$$

此方程组成立的条件为(1)只有电子注入,没有空穴注入。(2)外电场适当地大,既在 SiO<sub>2</sub> 中不存在因固定电荷和被陷电荷形成的零电场点<sup>[3]</sup>,也不会产生电场离化使被陷电子再激发。电子在该电场下漂移速度达到饱和,为 10<sup>7</sup> 厘米·秒<sup>-1</sup>。(3)导带中电子的消失只是由于陷阱的俘获和流出绝缘膜,忽略体复合。解方程(3)和(4)可以得到外电路电流为(见附录)

$$J = J_\infty + J_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \quad (5)$$

$$J_\infty = q d G \quad (6)$$

$$J_0 = q \left(1 - \frac{\bar{x}}{d}\right) \frac{N_t}{\tau_0} \quad (7)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{S \tau G} = \frac{q}{J_\infty \sigma} \quad (8)$$

把(5)式表示为  $\ln(J - J_\infty) = \ln J_0 - \frac{t}{\tau_0}$ , 则可以由它得到  $\tau_0$ , 进而得到俘获截面  $\sigma$ .

## 二、实 验

用光电流-电压法和光注电流法做了实验比较。因为当绝缘薄膜中被陷电荷在镜象电荷势阱范围之外时,光注入引起的电压移动等于 C-V 法中的平带电压移动<sup>[6]</sup>。由硅向绝缘膜注入电子时可以满足这样条件。光电流-电压法中的电压移动为

$$\Delta V = V_\infty \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right] \quad (9)$$

$$V_\infty = \frac{q}{C} \frac{\bar{x}}{d} N_t \quad (10)$$

C 为薄膜单位面积电容(法·厘米<sup>-2</sup>)。所以, 在同样光注条件下的光注电流衰减应与这个电压移动具有相同的时间常数。

实验样品为(100)P-Si 衬底,水汽氧化生成 1.56 微米厚的 SiO<sub>2</sub> 膜,表面蒸发一层厚度为 300 Å 左右的透明铝电极和 6000 Å 左右厚的接触电极,形成可以光注入的 MOS 结构。光源采用氘灯(主峰相应为 4.7 电子·伏左右)可以激发电子自硅进入 SiO<sub>2</sub>(硅价带至 SiO<sub>2</sub> 导带的势垒为 4.2 电子·伏),而不会形成空穴注入。样品的暗电阻要小于 10<sup>-14</sup>

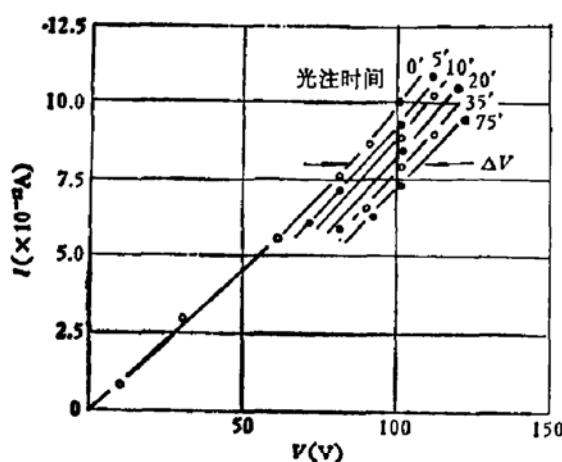


图 2 不同光注入时间的光电流-电压特性

安。光注入电流是用本所自制的光电导仪测量而得。它可以直接记录全部光注入电流随时间的衰减曲线。在与光电流-电压法比较的实验中，同时还要在不同光注入时间下快速测量其光电流-电压特性。

图 2 是不同光注入时间的光电流-电压曲线。把用光电流-电压法和光注入电流法测得的结果分别以  $(1 - \frac{\Delta V}{V_\infty})$  和  $(J - J_\infty)$  对时间的关系画于图 3 中比较，可以看出它们具有相同的斜率。计算结果列于表 1 内，其中陷阱密度和质心是通过下列公式而得

$$qN_s = CV_\infty + \tau_0 J_0 \quad (11)$$

$$\frac{x}{d} = \frac{CV_\infty}{qN_s} \quad (12)$$

式中电流密度由测量的电流除以光照面积 (0.06 厘米<sup>2</sup>) 而得。图 4 中的实线是用表 1 中

表 1

	光电流-电压法	光注入电流法
$\tau_0$ (sec)	1600	1550
$\sigma$ (cm <sup>2</sup> )	$8.2 \times 10^{-13}$	$10 \times 10^{-13}$
$N_s$ (cm <sup>-3</sup> )	$7.5 \times 10^{11}$	
$N_t$ (cm <sup>-3</sup> )		$4.8 \times 10^{10}$
$x/d$		0.4

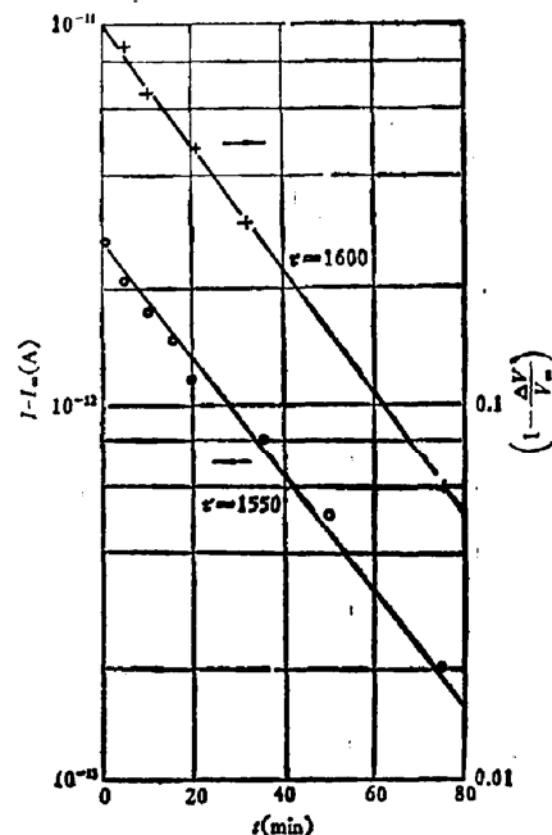


图 3 光注入法和光电流-电压法时间常数的比较

的数据，由(5)和(9)式分别计算而得，与实验点符合很好(取  $V_\infty = 23$  伏)。图 5 中给出了对具有两种俘获截面的陷阱的样品之测量结果，可以看出两种方法测得的数据也都是很一致的。

电场的影响。在不同的外加电压下测量了光注入电流(图 6)，由此得到的俘获截面与

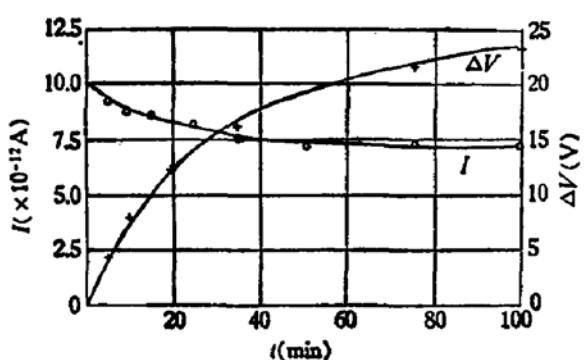


图 4 计算曲线与实验结果之比较

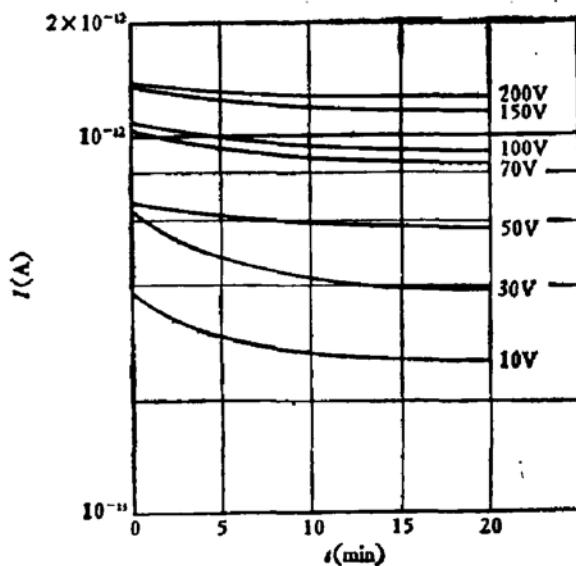


图 6 不同外加电压下的光注入电流曲线

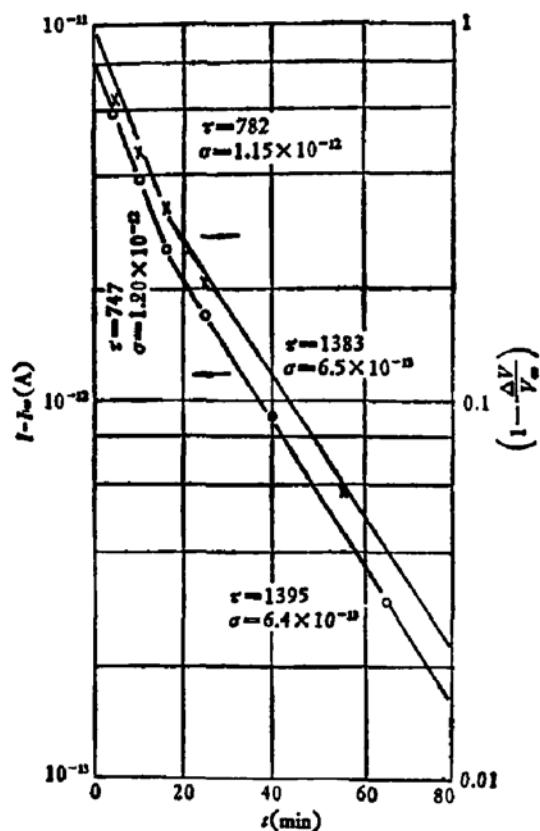


图 5 具有两种俘获截面的样品的测量结果

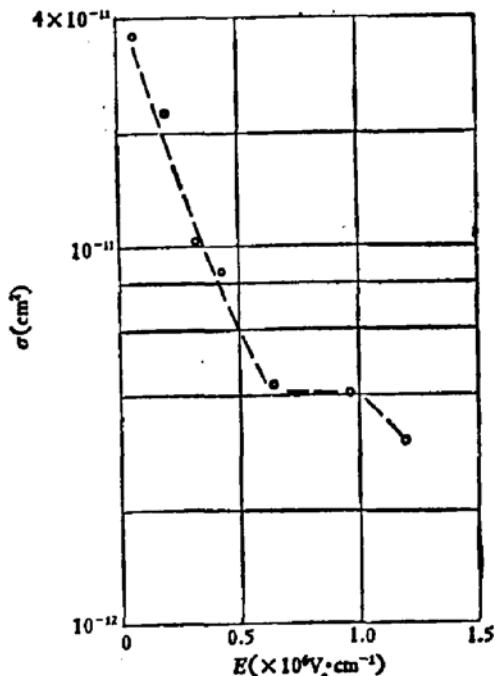


图 7 不同电场强度下测得的俘获截面

电场强度的关系示于图 7。在  $E = (0.6 \sim 1.0) \times 10^6$  伏·厘米 $^{-1}$  的范围内,  $\sigma$  趋于稳定值。当电场强度低时,随着被陷电荷的增加,将补偿外电场使绝缘膜中的实际电场大大下降。这不仅使光注入减弱,而且使电子漂移速度下降。故外电路电流呈现急剧的衰减。由此得到的俘获截面将比实际的偏高。例如,本样品的  $N = 7.5 \times 10^{11}$  厘米 $^{-3}$ , 对应的电场强度为  $3.5 \times 10^5$  伏·厘米 $^{-1}$ 。所以要在大于该值的电场下才能保证饱和电场条件。当电场强度过大时,将使被陷电子电离激发,而且 Poole-Frankel 效应<sup>[7]</sup>也会导致俘获截面下降,故测得的俘获截面偏低。在本实验中,电场强度以在  $8 \times 10^5$  伏·厘米 $^{-1}$  附近为宜。

### 三、结 论

在适当电压下用光注入电流衰减曲线可以测量绝缘膜中电子陷阱的热俘获截面。它比平带电压移动法更为简便，而且可以应用于非硅衬底的 MIM 结构中。

### 附 录

#### 方程

$$\frac{dn_t}{dt} = sn_t(N_t - n_t)$$

$$\frac{dn_t}{dt} = G - \frac{dn_t}{dt} - \frac{n_t}{\tau}$$

初始条件  $t = 0$  时  $n_t(0) = 0$ ,  $n_e(0) = 0$ .

方程的一般解是烦杂的。但是考虑到其物理过程会使问题大为简化。因为导带中电子  $n_e$  的变化是以时间常数  $\tau = \frac{d}{s}$  ( $10^{-11} \sim 10^{-12}$  秒) 表征的。而  $n_t$  值随时间的变化是以几百秒的时间常数表征。故可以首先把  $n_t$  视为常数解出  $n_e$ ，然后再以“稳态”的  $n_e^*$  值求解  $n_t$ ，得到

$$n_e = \frac{G\tau}{1 + s\tau(N_t - n_t)} \left\{ 1 - \exp \left[ -\left( \frac{1}{\tau} + sN_t - sn_t \right)t \right] \right\}$$

$$n_e^* = \frac{G\tau}{1 + s\tau(N_t - n_t)}$$

$$n_t = N_t \{ 1 - \exp[s\tau(n_t - Gt)] \}$$

$$\frac{dn_t}{dt} = \frac{s\tau GN_t \exp[s\tau(n_t - Gt)]}{1 + s\tau N_t \exp[s\tau(n_t - Gt)]}$$

在实际的陷阱密度范围内，满足  $s\tau N_t = d\sigma N_t \ll 1$ ，则  $\frac{dn_t}{dt}$  可以简化为

$$\frac{dn_t}{dt} = s\tau GN_t \exp(-s\tau Gt)$$

所以

$$\frac{dQ_t}{dt} = q \int_0^d \frac{dn_t}{dx} dx$$

$$= -q s\tau G N_t \exp(-s\tau Gt)$$

其中  $N_t = \int_0^d N_t dx$  为单位面积绝缘膜中的陷阱密度。

### 参 考 文 献

- [1] R. Williams, *Phys. Rev.* **140**, A569, (1965).
- [2] J. H. Thomas and F. J. Feigl, *J. Phys. Chem. Solids.* **33**, 2197 (1972).
- [3] D. J. DiMaria, *J. A. P.*, **47**, 4073 (1976).
- [4] T. H. Ning and H. N. Yu, *J. A. P.*, **45**, 5373 (1974).
- [5] D. J. DiMaria and F. J. Feigl, *Phys. Rev.*, **B9**, 1874 (1974).
- [6] C. N. Bergland and R. J. Powell, *J. A. P.*, **42**, 573 (1971).
- [7] K. C. Kao and W. Hwang, *Electrical Transport in Solids, International Series in the Science of the Solid State*, Vol. 14, by B. R. Pamplin.

## Measurements of Capture Cross Section of Traps in Insulating Films by Photoinjection Current Decay

Shi Changxin and Gu Weifang

(*Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica*)

### Abstract

The external circuit current of photoinjection in MOS structures is closely related to the capture cross section of traps. The dependence of external circuit current decay on time is given. Therefore, the capture cross section of traps can be measured easily. This method can be used in metal-insulating film-metal (MIM) structures without silicon substrate.