

# 77K NMOSFET 沟道热载流子注入效应\*

刘卫东 李志坚 刘理天

魏同立

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

(东南大学微电子中心 南京 210096)

**摘要** 通过综合测试 77K 和 295K 下先电子后空穴以及先空穴后电子注入时阈值电压和平带电压漂移以及  $I-V$  特性的蜕变,研究了 NMOSFET 中电荷俘获、界面态产生以及器件蜕变的低温特性和机制.提出的界面蜕变模型成功地解释了低温下 NMOSFET 热载流子增强蜕变的微观机制.

EEACC: 2560R

## 1 引言

低温下沟道热载流子效应使 MOSFET 特性蜕变增强,严重限制了 MOS 器件及其电路在低温环境下的潜在应用.迄今,已对其进行了广泛的研究<sup>[1-3]</sup>.然而,已有的结论基本是在单一沟道热载流子注入条件下而得到的.界面态和陷阱电荷是热载流子引起 MOSFET 蜕变的两种基本的微观机构,何者起主要作用目前尚不十分清楚.文献[4]和[5]归之于陷阱电荷,文献[6]和[7]则报道是界面态,而文献[8]认为应同时归因于两者.而且,热电子和热空穴对器件蜕变的贡献量也有待深入研究,认为器件蜕变主要或至少部分地由热空穴引起已可在文献[5]和[8]、[9]中见到.

本文首次报道 77K 下沟道中两种热载流子(双子)在不同注入次序时的实验结果,并与 295K 的情形作了详实的比较.文中采用一种综合性测试手段,得到了应力前后及过程中器件的  $I-V$  特性以及阈值电压( $V_{TH}$ )和平带电压( $V_{FB}$ )等;分析了双子注入过程中载流子俘获、界面态产生以及器件蜕变的低温特性;提出的与先空穴后电子注入模式相关的界面蜕变模型能够揭示低温下器件增强蜕变的微观本质.

## 2 实验原理

研究用 NMOSFET 的有效沟长为  $1.25\mu\text{m}$ ,栅氧化层厚度为  $T_{ox}=30\text{nm}$ .施加了两种应

\*国家自然科学基金重点资助项目

刘卫东 男,1965年生,助研,现从事深亚微米 MOSFET 结构特性、物理和工艺方面的研究  
1994年12月16日收到初稿,1995年2月24日收到修改稿

力:先电子后空穴(E-H)和先空穴后电子(H-E)注入,电子和空穴的注入时间均为3小时.为使77K和295K下的衬底电流基本相等,应力时源、衬底接地,而栅源电压 $V_{GS}$ 和漏源电压 $V_{DS}$ 分别为

注入模式	77K 偏置电压(V)	295K 偏置电压(V)
电子	$V_{DS}=6.0, V_{GS}=5.0$	$V_{DS}=6.5, V_{GS}=5.5$
空穴	$V_{DS}=6.0, V_{GS}=0.75$	$V_{DS}=6.5, V_{GS}=0.55$

借助于半导体参数分析仪HP4145B和高频C-V方法,测试了器件的 $V_{TH}$ 、 $V_{FB}$ 和I-V特性.阈值电压和平带电压漂移与界面态密度以及氧化层电荷的关系为<sup>[10]</sup>

$$\Delta V_{FB} = - (Q_{ox}x + qN_{sd}T_{ox})/\epsilon_{ox} \quad (1)$$

$$\Delta V_{TH} = - (Q_{ox}x - qN_{sa}T_{ox})/\epsilon_{ox} \quad (2)$$

其中 $\epsilon_{ox}$ 及 $Q_{ox}$ 为 $SiO_2$ 的介电常数和净陷阱电荷面密度, $x$ 为陷阱电荷中心离栅电极的距离, $N_{sa}$ 和 $N_{sd}$ 分别为受主型和施主型界面态的面密度.由(1)、(2)得到总的界面态密度为

$$N_{sa} + N_{sd} = \epsilon_{ox}(\Delta V_{TH} - \Delta V_{FB})/qT_{ox} \quad (3)$$

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 电荷俘获和界面态产生

图1和图2分别给出了应力E-H和H-E引起的 $\Delta V_{TH}$ 与应力时间的关系.由图1可见,电子注入时 $V_{TH}$ 开始上升,因而氧化层中产生了负电荷.此后对该器件进行了空穴注入.比较图1和图2发现应力H-E中的电子注入使 $\Delta V_{TH}$ 由负变正发生较大的改变,且在77K下更为显著.

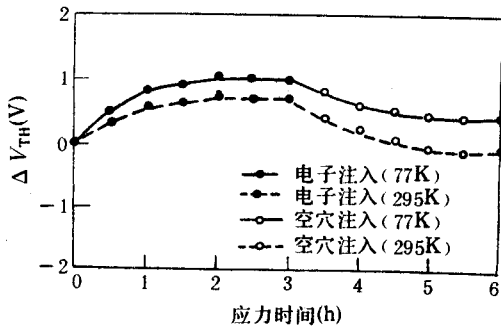


图1 77K和295K下E-H引起的 $V_{TH}$ 变化

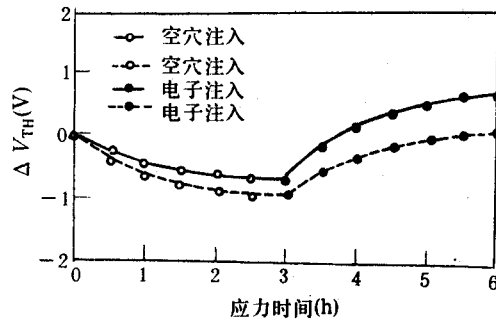


图2 77K和295K下H-E引起的 $V_{TH}$ 变化

与295K相比较,图1中77K电子注入引起了较大的 $V_{TH}$ 漂移,而图2中77K下空穴注入时 $\Delta V_{TH}$ 则较小.据(3)式以及 $\Delta V_{FB}$ 的测试结果,图3给出了E-H和H-E在77K和295K时产生的界面态密度 $D_{it}$ 随时间的变化关系.显然,77K下界面态产生较少;77K和295K下热电子产生的 $D_{it}$ 要高于热空穴产生的 $D_{it}$ ;与E-H中的空穴注入相比,H-E的电子注入导致了较高的界面态产生速率,因此施加H-E时,有更多的电子注入到氧化层中,且低温下尤为显著.

由于77K下产生的 $D_{it}$ 较小,因此图1中77K电子注入引起的较大的 $V_{TH}$ 漂移必定是

由增强电子俘获所致. 而 77K 下空穴俘获减弱, 否则它所引起的  $\Delta V_{TH}$  应该大于常温下的值.

### 3.2 I-V 特性

图 4 为 E-H 和 H-E 前后  $V_{DS}=0.1V$  时器件在 77K 下的正、反向转移特性. 可见, 应力后的电流值均低于其应力前之值, 且 H-E 后的反向特性表现得极其明显. 在亚阈值区, 它归因于陷阱净负电荷(文[2]认为此时无陷阱电荷); 在强反型区, 由于  $V_{GS} \gg V_{DS}$ , 产生的受主界面态开始为电子占据而引入负电荷. 这两种负电荷共同形成一窄势垒 ( $\Delta\Phi$ ), 此势垒位于器件的漏结附近.

图 5 给出了 H-E 前后器件在 77K 下  $V_{DS}=0.1V$  时的正反向转移特性, 它是在 77K 应力后, 器件升温至 295K 30 分钟, 再降至 77K 时得到的. 可见, 应力前后亚阈区的特性已基本恢复, 说明俘获中心大多数为浅陷阱; 而强反型区曲线基本未变. 因此电流降低效应主要由界面态所致.

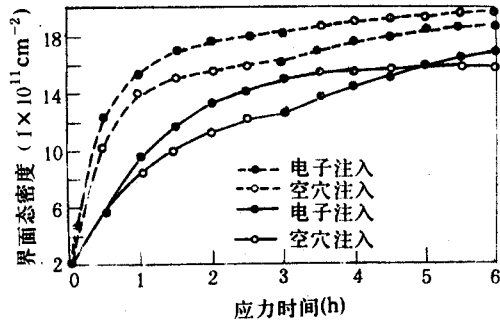


图 3 77K 和 295K 下 E-H 和 H-E 时的  $D_i$  变化

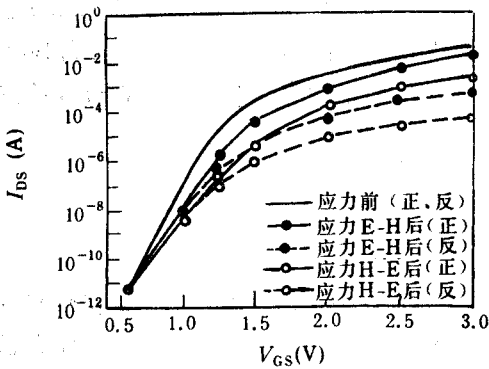


图 4 77K 应力 E-H 和 H-E 前后器件在 77K 下的正反向转移特性,  $V_{DS}=0.1V$

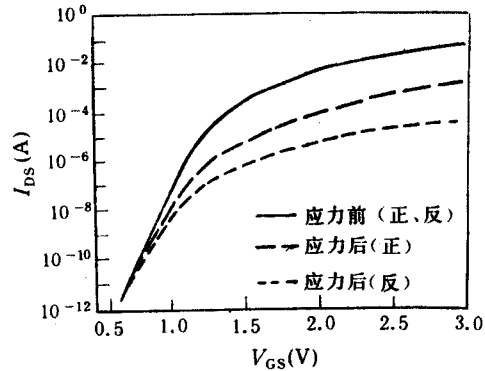


图 5 应力 H-E 前后器件在 77K 下  $V_{DS}=0.1V$  时的正向和反向转移特性曲线

窄势垒  $\Delta\Phi$  的影响随温度而变化. 当器件反向工作时,  $\Delta\Phi$  实际上已位于源结附近. 此时沟道电流正比于  $\exp[-(\Phi+\Delta\Phi)/kT]$ ,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $\Phi$  为应力前源结的势垒高度. 由于 77K 下归一化势垒  $(\Phi+\Delta\Phi)/kT$  大于 295K 时的对应值, 所以实验中能够观察到 77K 应力 H-E 后, 相同偏置时器件在 295K 时的反向漏源电流要大于 77K 下的反向电流值.

## 4 界面蜕变模型

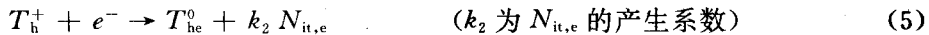
将 77K 下 H-E 中的空穴注入延长至 5 小时后, 发现空穴注入的延长并未使  $\Delta V_{TH}$  有明显变化; 但是后续电子注入却使  $\Delta V_{TH}$  显著增加, 已近 1V. 说明空穴对于后续电子注入有重

要的影响。

设 Si/SiO<sub>2</sub> 界面附近存在中性陷阱中心  $T^0$ ,  $T^0$  能够俘获注入的大多数空穴而带正电荷成为  $T_h^+$ , 并将产生界面态  $N_{it,h}$  (如图 3, 但文[8]未计及此  $N_{it,h}$ ). 这一过程可表示为



$k_1$  为  $N_{it,h}$  的产生系数.  $T_h^+$  作为库仑中心能够俘获电子成为  $T_{he}^0$ , 并产生界面态  $N_{it,e}$ :



氧化层有效电荷的改变量  $\Delta Q$  应近似等于产生的界面态 ( $k_1 N_{it,h} + k_2 N_{it,e}$ , 贡献负电荷), 未被电子中和的正陷阱中心 ( $N_{Th}^+ - N_{The}^0$ ) 以及被电子占据的固有界面态密度  $Q_0$  之和:

$$\Delta Q = N_{Th}^+ - k_1 N_{Th}^+ - (k_2 + 1) N_{The}^0 - Q_0 \quad (6)$$

$N_{+Th}$  和  $N_{The}^0$  分别为  $T_h^+$  以及  $T_{he}^0$  的密度. 这样  $\Delta V_{TH} = \Delta Q / C_{ox}$ ,  $C_{ox}$  为单位面积栅氧化层电容.

式(4)–(6)给出了应力 H-E 时 Si/SiO<sub>2</sub> 界面附近电荷俘获、界面态产生以及器件蜕变的微观模型. 据量子理论, 能量为  $E_n$  的电子隧穿进入 SiO<sub>2</sub> 的几率为

$$P = \exp\left[-2 \int_0^{T_d} K(E_n) dx\right] \quad (7)$$

$T_d$  为隧穿距离,  $K(E_n) = 2\pi \{2m_n^* [q\varphi(x) - E_n]\}^{1/2} / h$ , 其中  $\varphi(x)$  为界面势垒高度,  $m_n^*$  是电子的有效质量,  $h$  为普朗克常数. 于是

$$P = \exp\left[-4\pi I (2m_n^*)^{1/2} / h\right] \quad (I = \int_0^{T_d} [q\varphi(x) - E_n]^{1/2} dx) \quad (8)$$

空穴注入使势垒  $\varphi'(x) < \varphi(x)$ , 由(8)得到  $P' > P$  ( $P$  为无空穴注入时的几率); 由  $m_n^*(77K) < m_n^*(295K)$ , 又得  $P_{77K} > P_{295K}$ . 因此 77K 下 H-E 时, 将有较多的电子注入到 SiO<sub>2</sub> 中, 导致较高的  $D_{it}$  (图 3), 并使  $\Delta V_{TH}$  有较大的改变 (图 2) 以及器件的严重蜕变 (图 4), 且在 77K 下增强.

## 5 结论

对 77K 和 295K 下应力 E-H 和 H-E 前后  $V_{TH}$  与  $V_{FB}$  漂移以及  $I-V$  特性的测试和研究表明: ① 77K 下电子俘获增强, 而热空穴俘获过程减弱; ② 77K 和 295K 下, 热电子产生界面态的能力均高于热空穴; ③ 77K 下 NMOSFET 具有较高的抗界面态产生能力; ④ 陷阱与界面态电荷所形成的窄势垒影响在低温下增强; ⑤ 强反型区, 界面态电荷的影响居于主要地位.

由于空穴能引起后续电子的增强俘获, 同时空穴引起界面势垒的降低以及电子有效质量的减小能使电子隧穿增强, 因此 H-E 比 E-H 使器件更为严重蜕变, 并在低温下增强. 提出的界面蜕变模型也适用于 77K 和 295K 下的动态热载流子效应情形, 故具有“准静态”属性.

## 参 考 文 献

- [1] P. Herenmans *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-37(4):980.
- [2] S. L. Von Bruns and R. L. Anderson, IEEE Trans. Electron Devices, 1987, ED-34(1):75.
- [3] T. H. Ning, J. Appl. Phys., 1978, 49(12):5997.
- [4] K. K. Ng and G. W. Taylor, IEEE Trans. Electron Devices, 1983, ED-30(8):871.

- [ 5 ] K. -L. Chen *et al.* , IEEE Trans. Electron Devices, 1985, **ED-32**(2):386.
- [ 6 ] C. Hu *et al.* , IEEE Trans. Electron Devices, 1985, **ED-32**(2):375.
- [ 7 ] C. L. Wilson and T. J. Russell, IEDM Tech. Dig. , 1985, 72.
- [ 8 ] K. R. Hofmann *et al.* , IEEE Trans. Electron Devices, 1985, **ED-32**(3):691.
- [ 9 ] E. Takeda *et al.* , IEEE Trans. Electron Devices, 1983, **ED-30**(6):675.
- [10] Y. Nissan-Cohen *et al.* , IEDM Tech. Dig. , 1982, 182.

## Effects of Channel Hot-Carrier Injections in NMOSFET's at 77K

Liu Weidong, Li Zhijian and Liu Litian

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Wei Tongli

(*Microelectronics Center, Southeast University, Nanjing 210096*)

Received 16 December 1994, revised manuscript received 24 February 1994

**Abstract** A combined measurement method for different channel hot-carrier injection sequences is employed to investigate the 77K hot-carrier effects in NMOSFET's. Low-temperature behavior of charge trapping, interface state generation and device degradation as well as the corresponding mechanisms are well perceived. The proposed interface-degradation model is capable of interpreting the microscopic mechanisms for the enhanced low-temperature hot-carrier effects in NMOSFET's.

EEACC: 2560R