

nMOSFET's 界面对热空穴俘获率的研究*

张 炯 吴正立 李瑞伟

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

摘要 本文中,我们利用 nMOSFET's 器件反向关态电流对器件的热空穴的俘获率(我们定义它为一个热载流子应力过程中界面俘获的空穴量)进行了初步的探讨.结果表明,热空穴的俘获率随应力时间呈对数增长;与漏附近栅氧中的纵向电场有直接的关系;与热空穴的注入效率没有明显的联系

EEACC: 0170N, 2560R

1 引言

随着 MOS 集成电路技术的发展,器件的尺寸不断缩小,热载流子效应成为器件可靠性研究的重要课题,热载流子作用的机理是其中重要的一项内容

在热载流子效应的早期研究中,只考虑到热电子的作用^[1,2],现在,热空穴的作用也得到很多研究人员的关注^[3,4].一般认为,热空穴的作用主要表现在,注入在界面处的空穴能有效地降低 Si-SiO₂ 的电子势垒,协助热电子的注入,并在界面态的形成中也有相当的作用.这里,界面对热空穴的俘获率的确定是一个重要的参量,但是,由于热空穴的监测比较困难,长期以来对热空穴的俘获率问题没有适当的测量办法.处理相关问题时,只能进行简单的推测

我们在 nMOSFET's 的研究中发现,器件的反向关态电流(I_{offr})可以作为界面热空穴俘获率的一个表征,这是因为在热载流子应力过程中,器件沟道区产生的热空穴,倘若注入到界面并被界面所俘获,则聚积在漏端附近的 Si-SiO₂ 界面处,从而能有效地影响邻近的漏-沟结势垒.聚积的空穴越多,则使该势垒越低;反之则越高.而器件的反向关态电流(I_{offr})的大小主要取决于这个势垒的高低:这个势垒越高,表现为 I_{offr} 越小,反之则 I_{offr} 越大.综上所述,界面处俘获的空穴越多,器件的 I_{offr} 越大;界面处俘获的空穴越少,则 I_{offr} 越小.这就是说,虽然不能直接测出界面俘获的空穴量的值,但是 I_{offr} 已可以准确反应俘获空穴量的变化趋势

* 本文工作得到国家“八五”和“九五”攻关项目的支持

张 炯 男,1969 年出生,博士生,现从事小尺寸 MOS 器件的可靠性及 VLSI 工艺研究

吴正立 男,1940 年出生,副教授,从事超大规模集成电路工艺研究

李瑞伟 男,1936 年出生,博士生导师,从事半导体器件物理及微电子学研究

1997-03-02 收到,1997-04-29 定稿

在本文的工作中,我们利用 I_{offr} 对器件热空穴的俘获率进行了研究,初步探讨了界面对热空穴的俘获率与注入效率及栅氧中纵向电场等的关系

2 器件的制备和实验

实验中所用的器件是在我所 $1\mu\text{m}$ 工艺线制备。我们利用双多晶硅栅(nMOSFET's 用 n^+ 栅, pMOSFET's 用 p^+ 栅)的自对准工艺和过刻方法,在 P-型(100)硅片上($30\sim 50\Omega\cdot\text{cm}$)制备了 W/L 从 $20\mu\text{m}/0.7\mu\text{m}$ 到 $20\mu\text{m}/2\mu\text{m}$ 的 MOSFET's 单管。沟道区进行了两次注入,分别调开启 (B^+ 注入剂量: $3\times 10^{12}/\text{cm}^2$, 注入能量: 20keV) 和防穿通 (B^+ 注入剂量: $1.5\times 10^{12}/\text{cm}^2$, 注入能量: 120keV)。栅氧厚度为 10nm 和 20nm , 对应的结深分别为 $0.15\mu\text{m}$ 和 $0.25\mu\text{m}$ 。

在实验中,我们周期性地给被测样品施加不同时间长度和不同栅电压的热载流子应力,并在应力的间隙(即弛豫时间中)监测器件的正、反向关态电流。关态电流的测量为: $V_d=5\text{V}$, $V_g=V_s=V_{\text{sub}}=0\text{V}$ 时的漏电流; 反向关态电流的测量即交换器件的源、漏端

所有的测试均在 HP4062 半导体参数测试仪上进行。

3 实验结果

我们对样品 1 施加了不同时间长度的相同热载流子应力,测量每次应力后的 I_{offr} 的变化,具体条件及结果如图 1 所示

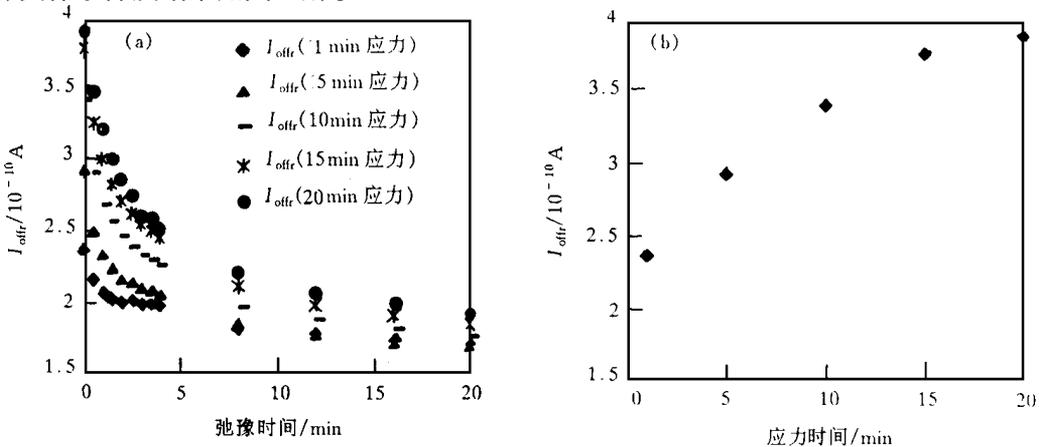


图 1 LDD-nMOS ($W/L=20/0.9\mu\text{m}$, $T_{\text{ox}}=10\text{nm}$) 的 I_{offr}

(a) 在弛豫时间里的变化; (b) 与应力时间的关系(数据为(a)中弛豫时间为 0 时的值);
应力条件: $V_d=6\text{V}$, $V_g=2.5\text{V}$, $V_s=V_{\text{sub}}=0\text{V}$; 各次的应力时间如图(a)中所标

图 1 的(a)反映了 I_{offr} 随弛豫时间的变化呈指数下降的规律; (b) 中数据为(a)中弛豫时间为 0 时的值, 图(b)显示出俘获的空穴量随应力时间呈对数增长的趋势

之所以在(b)中提取弛豫时间为 0 时的值, 是因为此时的值反映了在刚刚结束的应力过程中漏端界面处俘获的空穴量, 随后 I_{offr} 值的下降是由于俘获的空穴所处的能级较浅, 空穴逐渐消散, 使漏-沟结的势垒不断抬高, 导致 I_{offr} 的降低

在样品 2 的实验中,我们固定应力时间为 5 分钟,并且 V_d 取 6V 不变,改变 V_g 大小,具体的实验条件及结果如图 2 所示

从图 2(b) 可以看到,随着 V_g 的增大, I_{offr} 几乎呈线性增大,这就是说漏端附近的界面处俘获的热空穴量随着 V_g 的增大而线性增长

在我们的实验中,对于栅氧为 10nm 和 20nm 的器件 (w/L 从 $20\mu\text{m}/0.7\mu\text{m}$ 至 $20\mu\text{m}/2.0\mu\text{m}$), 均表现出图 1 和图 2 所示的特性

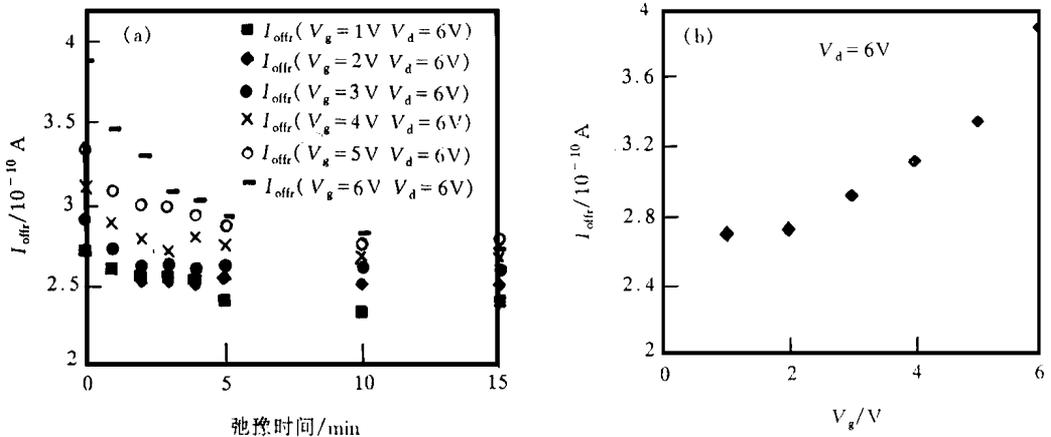


图 2 LDD-nMOS ($w/L = 20\mu\text{m}/0.9\mu\text{m}$, $T_{\text{ox}} = 10\text{nm}$) 在不同应力条件(如(a)中所标)下的 I_{offr}
(a) 随弛豫时间的变化; (b) 随应力条件的变化(数据为(a)中弛豫时间为 0 时的值).
应力时间均为 5 分钟, $V_s = V_{\text{sub}} = 0\text{V}$.

4 讨论

4.1 俘获率与应力时间的关系

从图 1 的实验结果可知,热载流子应力作用下器件反向关态电流与应力时间的关系可近似表示成:

$$I_{\text{offr}} = K_1 \times \ln(t_{\text{stress}}) + K_2$$

这里 t_{stress} 是应力时间; K_1 和 K_2 表示与应力条件及器件尺寸相关的拟合参数. 该式表示,反向关态电流 (I_{offr}) 随应力时间呈自然对数增长. 从引言的分析可知,界面俘获的空穴量与 I_{offr} 的变化趋势是一致的,所以上式也近似反应了界面对空穴的俘获率随应力时间变化的趋势. 至于界面俘获的空穴量与 I_{offr} 的准确关系,理论上应该建立 I_{offr} 与结势垒的关系,并通过泊松方程建立空穴量与结势垒的关系,就可以得出空穴量与 I_{offr} 的关系式. 但鉴于多种因素的影响,这一方面的工作尚无大的进展.

4.2 俘获率与注入效率的关系

正如我们在引言中所说,由于热空穴的相关测试较为困难,对于界面处的俘获空穴的测量尚无报道. Hereman 等研究人员利用对栅电流的测量,在理论上定性分析了空穴(和电子)的注入效率^[5],图 3 给出他们的结果.

Hereman 等认为,对于固定的漏电压,热空穴的注入在 $V_g \sim V_{\text{th}}$ 时呈现峰值,这是沟道载流子的数量和横向加速电场大小的相互制约造成的. 当器件处于亚阈值区时,沟道载流子的

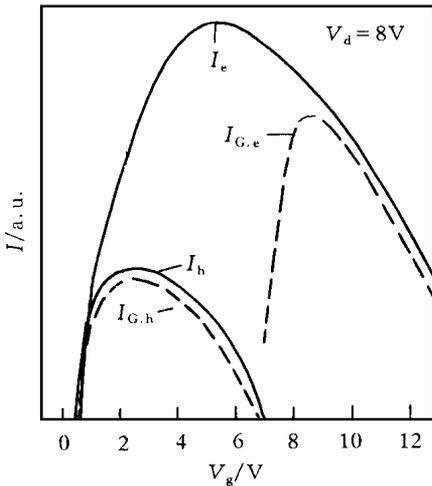


图 3 定性估计在固定漏电压下 nMOSFET 的栅电流和载流子的注入率
虚线表示栅电流, 实线表示载流子的注入率
(引自[5], P5 图 1.2)

时, 随着 V_g 的增大, 漏端处栅氧中的纵向电场强度降低 (其方向始终指向栅), 所以这个电场将越来越不利于注入的空穴穿过 SiO_2 介质层, 这就是说更有利于注入的热空穴滞留在 SiO_2 层中, 成为被俘获载流子. 这种解释与 Hereman 关于空穴的注入效率在 V_g 较低时有个峰值的推断也不矛盾, 因为在 V_g 较低时, 注入的热空穴由于栅氧中纵向电场的协助, 多数穿过栅氧而形成了栅电流, 表现在实验中能测到栅电流在此时呈现一个峰值, 如图 4 所示

所以热空穴的俘获率取决于栅氧中纵向电场是否有利于注入的空穴在栅氧中滞留

5 结论

我们利用 nMOSFET 的反向关态电流 (I_{off}) 对 MOS 器件界面对热空穴的俘获率进行了研究, 我们发现俘获率主要由栅氧中的纵向电场决定, 而与器件沟道热空穴的注入条件及注入效率无直接的联系

数量随栅压呈指数增长, 相应地使注入量提高, 表现为载流子穿越 SiO_2 而形成的栅电流的增大; 而当 V_g 较大时, 横向电场不断减小, 使注入的几率减小. 这样, 热空穴的注入效率取决于 V_g 的大小 ($V_g < V_d$).

而我们的实验结果表明, 界面对注入的热空穴的俘获效率虽然也与 V_g 的大小有关, 但却是随 V_g 的增大而增大 ($V_g < V_d$), 这表明了热空穴的俘获效率与注入效率没有直接的联系, 在实际研究工作中不能简单地互相替代

4.3 热空穴的俘获效率与栅氧中纵向电场的关系

样品 1 的实验结果表明 (图 1(b)), 在应力时间为 15 分钟内不会出现俘获饱和现象, 所以对于样品 2 的实验中, 应力时间仅为 5 分钟, 可以排除可能出现的俘获的饱和问题

从样品 2 的结果可知, 空穴的俘获效率显然与栅-漏电压有直接的关系. 当 V_d 固定为一个较大值

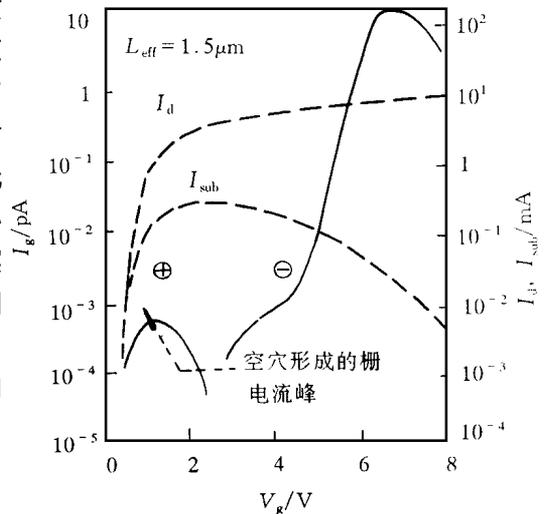


图 4 nMOSFET ($L_{eff} = 1.5\mu m, W = 20\mu m, T_{ox} = 21nm, X_j = 0.21\mu m$) 的漏电流, 衬底电流, 栅电流随栅压的变化 ($V_d = 6.5V$)
(引自[5], P8 图 1.4).

参 考 文 献

- [1] S. A. Abbas and R. C. Dockerty, IEDM Tech. Dig., 1975, 35
- [2] P. E. Cotrell, R. R. troutman and T. H. Ning, IEEE Trans Electron Devices, 1979, ED-26(4): 520
- [3] H. Gesch, J. P. Leburton and G. E. Dorda, IEEE Trans Electron Devices, 1982, ED-29(6): 913
- [4] R. B. Fair and R. C. Sun, IEEE Trans Electron Devices, 1981, ED-28(1): 83
- [5] P. Hereman, M. brox *et al.*, "The Mechanisms of Hot Carrier Degradation", chap. 1 of Hot Carrier Design Considerations for MOS Devices and Circuits edited by Cheng T. Wang. Published by Van Nostrand Reinhold, 1992

Research on Trapping of Injected Hot Hole

Zhang Jiong, Wu Zhengli, Li Ruwei

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 2 March 1997, revised manuscript received 29 April 1997

Abstract The trapping of injected hot hole in nMOSFET 's has been studied by using off-state current in reverse mode (I_{offr}). It is shown that the number of trapped hole at Si-SiO₂ interface: (1) increase in logarithmic relation with the hot carrier stress time; (2) is mainly determined by the longitudinal electrical field in gate oxide; (3) has no close relation with the injection efficiency of the hot hole

EEACC: 0170N, 2560R