

# 反向关态电流在热载流子蜕变 效应研究中的应用\*

张 炯 李瑞伟 钱 伟

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

**摘要** 本文研究了 nMOSFET 器件的反向关态电流 ( $I_{\text{offr}}$ ) 特性。我们发现, 刚受过热载流子应力的器件  $I_{\text{offr}}$  呈现一个突然的增高, 而在随后的一段时间里(我们定义其为弛豫时间)又呈指数下降, 这一现象是由于在热载流子应力过程中注入的热空穴的消散造成的。所以我们认为  $I_{\text{offr}}$  不但可以作为热空穴注入的有力证据, 而且可以作为热空穴研究的有效手段。

EEACC: 0170N, 2560R

## 1 引言

随着集成电路的发展, 器件尺寸不断缩小, 热载流子蜕变效应成为其发展的一个重要限制因素<sup>[1, 2]</sup>。热载流子效应的研究作为一个重要课题, 一直为国内外有关研究者所重视。

比较经典的观点认为热电子的注入是器件热载流子失效的主要原因<sup>[1~3]</sup>。但是 Heremans 等人认为热空穴的注入在器件热载流子失效中也起着重要的作用<sup>[4~6]</sup>。虽然后者的观点为很多人所接受, 但问题是, 目前还缺乏热空穴注入研究的有力手段。器件的阈值电压, 跨导等参数的变化 ( $\Delta V_{\text{th}}$ ,  $\Delta G_{\text{m}}$ ) 更多地只是反映了热电子的注入。

程玉华等人研究了不同应力(热电子应力和热空穴应力)后器件阈值的不同变化趋势, 希望能揭示热空穴注入的存在和作用<sup>[7, 8]</sup>, 但其实验中对电子注入和空穴注入应力的划分却值得推敲。

我们在 nMOSFET 器件的热载流子蜕变效应的研究中发现, 当器件受热载流子应力作用后, 反向关态电流 ( $I_{\text{offr}}$ , 即交换应力时的源、漏区测得的漏端电流) 表现出有意义的规律性变化。进一步的研究表明,  $I_{\text{offr}}$  的这种变化反映了热空穴注入及衰变过程。所以  $I_{\text{offr}}$  可以作为热空穴注入的表征参数。

## 2 器件制备及实验说明

实验用的器件由我所  $1\mu\text{m}$  工艺线制备。P 型(100)硅片衬底电阻率为  $30\sim 50\Omega\cdot\text{cm}$ , 我

\* 本文的工作得到国家“八五”和“九五”计划项目的支持。

张 炯 男, 1969 年出生, 博士生, 主要从事小尺寸 MOS 器件可靠性及工艺研究。

李瑞伟 男, 1936 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体器件物理及 VLSI 的研究。

1997-02-22 收到, 1997-05-30 定稿。

们制备了 $w/l$  从 $20\mu\text{m}/0.7\mu\text{m}$  到 $20\mu\text{m}/2.0\mu\text{m}$  的LDD-nMOS 器件,LDD 的侧壁(SPACER) 长约 $150\text{nm}$ , 器件阈值为 $0.6\sim 0.7\text{V}$ . 沟道区进行了两次注入, 分别用于调开启( $B^+$  剂量:  $3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  能量:  $20\text{keV}$ )和防穿通( $B^+$  剂量:  $1.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  能量:  $120\text{keV}$ ). 栅氧的厚度为 $10\text{nm}$  和 $20\text{nm}$ , 分别对应结深 $0.15\mu\text{m}$  和 $0.25\mu\text{m}$ .

实验过程是: 周期性地给被测器件施加热载流子应力(应力条件如图 1 说明中所述), 在应力周期的间隙(即弛豫时间中) 不断监测器件的正向和反向关态电流. 关态电流为 $V_d = 5\text{V}, V_g = V_s = V_{\text{sub}} = 0\text{V}$  时的漏端电流( $I_{\text{drain}}$ ). 所有的测试均在 HP4062 半导体参数测试仪上进行.

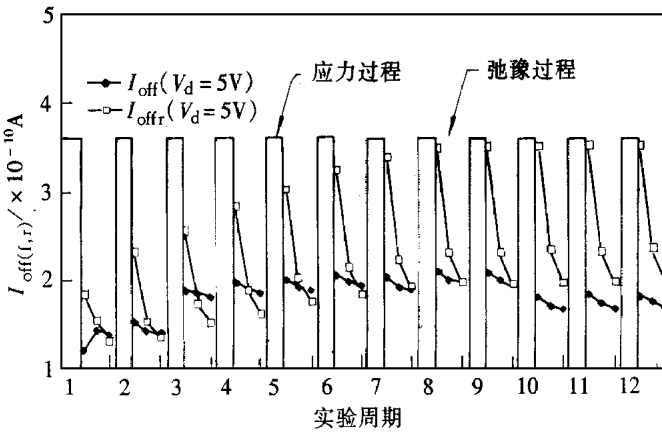


图 1 LDD-nMOS( $w/l = 20\mu\text{m}/0.8\mu\text{m}; T_{\text{ox}} = 10\text{nm}$ )

的正、反向关态随周期性应力时间的变化

一个实验周期为: 应力过程( $V_d = 6\text{V}, V_g = 2.5\text{V}, V_s = V_{\text{sub}} = 0\text{V}$ ; 应力时间 5 分钟)和弛豫过程(测三次关态电流, 各次间隔 5 分钟).

为了解释实验结果, 还利用器件二维模拟软件 TMA-MEDICI<sup>[9]</sup>进行了器件的表面势分析.

### 3 实验结果及讨论

图 1 给出一个典型的实验结果. 作为对比, 图中同时给出正向关态电流( $I_{\text{off}}$ )的变化. 图中的 $I_{\text{offr}}$ 呈现出两个特性: (1) 每次应力过程后, $I_{\text{offr}}$ 均有大的上升, 且随后呈急剧的下降趋势; (2) 累积一段时间的应力后(约 5 分钟 $\times$  8 个周期= 40 分钟),  $I_{\text{offr}}$ 呈饱和趋势.

对其它尺寸 NMOS 样品的测量中, 我们也看到几乎相同的结果. 下面, 我们分别就这二个特性进行分析:

(1) 由于关态电流的大小主要取决于测量时的源-沟势垒, 所以反向关态电流主要由器件加热载流子应力时的漏-沟势垒的变化所决定的. 因此, 我们先考察一下在器件受过热载流子应力后, 器件的漏-沟势垒的状况. Hofmann 根据电荷泵实验的结果, 认为热载流子应力后注入的电荷分布如图 2 所示<sup>[10]</sup>, 但是我们认为, 图中的负电荷峰应移至虚线处(解释见本节的(2)). 并且, 图 2 给出的注入界面电荷分布只表示应力刚结束时的情况, 因为注入的空穴(正电荷)在弛豫时间里会减少(它们注入得比较浅).

我们先利用 TMA-MEDICI 软件模拟, 定性给出减少的空穴对漏-沟势垒(即测反向关态电流时的源-沟势垒)的影响.

为了简化模拟, 我们采用 BOX 分布代表图 2 中的净电荷分布. 我们简单地用 $10^{10}\text{cm}^{-2}$ 的面密度代表应力刚结束时的界面电荷状况, 用 $10^{11}\text{cm}^{-2}$ 代表弛豫时间中的界面电荷状况, 模拟结果见图 3.

由图 3 可定性看到: 随着界面的正电荷减少(即净的负

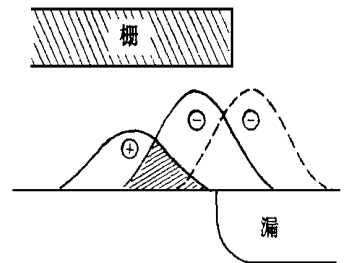


图 2 根据电荷泵及有关参数得到的应力后注入的界面电荷分布情况. 引自文献[10], 虚线为作者所加.

电荷增多), 则源-沟势垒增高; 反之则使源-沟势垒降低 这就是说, 源-沟势垒高度在热载流子应力后最低, 而随着空穴在弛豫时间中减少而增高 这一过程表现在关态电流上, 即为关态电流在应力后有一个剧增, 而随后下降的过程

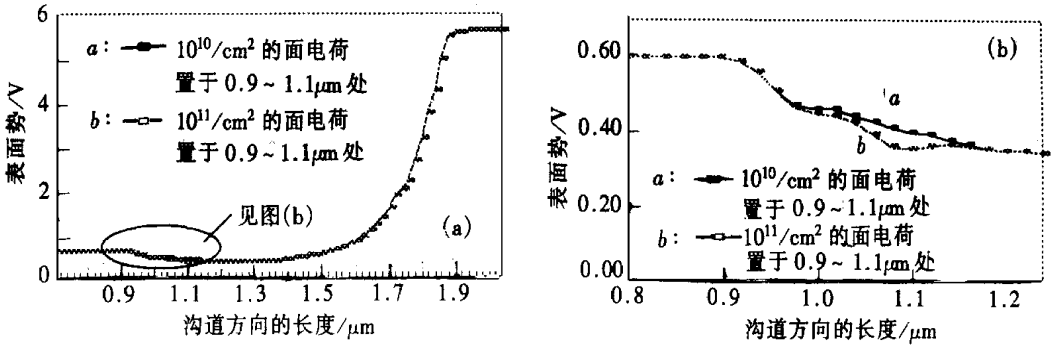


图 3 TMA-MEDICI 模拟的 LDD-nMOS 器件反向工作时的表面势

$L_{eff} = 0.8\mu m, T_{ox} = 10nm, V_d = 5V, V_g = V_s = V_{sub} = 0V.$

模拟中的器件结构基本与我们的实际器件一致; 沟道区从 1~1.8 $\mu m$ .

(2) 图 1 中应力后  $I_{offr}$  的上升, 说明空穴注入对漏-沟势垒的影响占优势, 这是因为认为界面的注入电子更多地分布在漏区 ( $n^+$ ) 上, 因而对器件表面势的影响较小; 而  $I_{offr}$  的饱和则说明了空穴的注入能力有限, 这也是人们的共识

从上述的讨论可以得出下述结论:  $I_{offr}$  在应力后的行为标志了热空穴注入的存在; 应力后  $I_{offr}$  的大小反应了界面处空穴数量的相对多少.

为了考察  $I_{offr}$  在弛豫时间里的变化规律, 我们进行了下面的实验

我们在同一器件上施加不同时间长度的应力, 并考察了各次应力后的  $I_{offr}$  的变化情况, 实验结果如图 4 所示

图 4 中的各条曲线几乎都呈指数下降的规律, 我们用下式表示:

$$I_{offr} = A \exp(-t/\tau) \tag{1}$$

式中  $A$  是与应力条件和界面的初始状态有关的参量;  $\tau$  是弛豫时间常数;  $t$  为弛豫时间 图中的曲线表明,  $\tau$  约为 5 分钟 (我们在其他尺寸的器件上也得到了类似的结论).

### 4 结论

本文对应力后 nMOSFET's 的反向关态电流进行了研究 研究的结果表明, 应力后  $I_{offr}$  的弛豫可以作为热空穴注入的一个有效的证明 进一步的研究揭示了: 热载流子应力后的  $I_{offr}$  随着弛豫时间呈指数下降的规律性

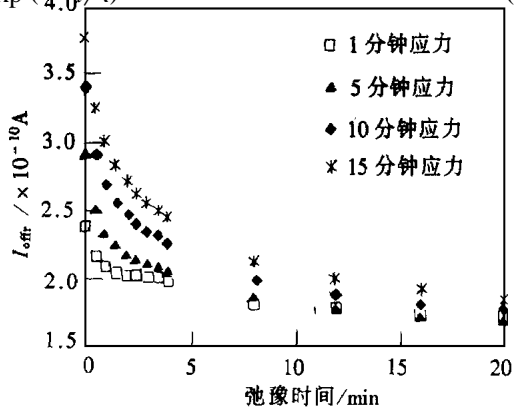


图 4 LDD-nMOS ( $w/L = 20\mu m/0.9\mu m, T_{ox} = 10nm$ ) 的  $I_{offr}$  在弛豫时间里的变化 应力条件:  $V_d = 6V, V_g = 2.5V, V_s = V_{sub} = 0V;$  各次的应力时间如图中所标

## 参 考 文 献

- [ 1 ] S. A. Abbas and R. C. Dockerty, IEDM Tech. Dig., 1975, 35
- [ 2 ] P. A. Cotrell, R. R. Troutman and T. H. Ning, IEEE Trans Electron Devices, 1979, **ED-26**: 520
- [ 3 ] T. H. Ning, C. M. Osburn and H. N. Yu, J. Electronic Matter, 1977, **6**(2): 65
- [ 4 ] R. B. Fair and R. C. Sun, IEEE Trans Electron Devices, 1981, **ED-28**: 238
- [ 5 ] H. Gesch, J. P. Leburton and G. E. Dorda, IEEE Trans Electron Devices, 1982, **ED-29**: 913
- [ 6 ] P. Hereman, M. Brox *et al.*, "The Mechanisms of hot carrier degradation", chap. 1, p. 71 of Hot Carrier Design Considerations for MOS Devices and Circuits, edited by Cheng T. Wang, Van Nostrand Reinhold, 1992
- [ 7 ] 程玉华, 李瑞伟, 李志坚, 半导体学报, 1993, **12**: 728
- [ 8 ] 程玉华, 清华大学博士学位论文, 1989
- [ 9 ] TMA-MEDCIVersion 2.0, Technology Modeling Associates, Inc., 1994
- [ 10 ] K. R. Hofmann, C. Werner, W. Weber and G. Dorda, IEEE Trans Electron Devices, 1985, **ED-32**: 691.

## Application of Off-State Current in Reverse Mode in Hot Carrier Effect(HCE)

Zhang Jiong, Li Ruiwei and Qian Wei

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 22 February 1997, revised manuscript received 30 May 1997

**Abstract** This paper presents research on the off-state current in reverse mode ( $I_{offr}$ ) of nMOSFET's. The experimental results show that the  $I_{offr}$  increases after hot carrier stress and falls exponentially afterwards. This is attributed to the diminution of the interface holes which had been ejected and trapped during hot carrier stress procedure. So, we conclude that  $I_{offr}$  can serve as a novel and evident indicator of hot hole injection in nMOSFET's. It can also be used as an effective method in studying hot hole effect.

**EEACC:** 0170N, 2560R