

# 背面 $\text{Ar}^+$ 轰击对 n-沟 MOSFET 特性的影响

黄美浅 李观启 曾绍洪

(华南理工大学应用物理系, 广州 510641)

**摘要:** 研究了低能量背面  $\text{Ar}^+$  轰击对 n-沟 MOSFET 特性的影响。用低能量(550eV)氩离子束轰击 n-沟 MOSFET 芯片的背面, 能改善其阈值电压  $V_T$ 、跨导  $g_m$ 、沟道电导  $g_d$  和有效迁移率  $\mu_{\text{eff}}$  等参数。结果表明, 随着轰击时间的增加, 阈值电压先减小, 随后变大; 而跨导、沟道电导和有效迁移率先增大, 随后减小。实验证明, 上述参数的变化是由于界面态密度和固定电荷密度变化的结果。

**关键词:** 背面  $\text{Ar}^+$  轰击; n-MOSFET

**PACC:** 7340; 7850; 8140; 8160

**中图分类号:** TN386      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2001)06-0774-05

## 1 引言

MOS 器件的性能和稳定性对离子束损伤很敏感, 而  $\text{SiO}_2$  层和  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  界面就更是如此<sup>[1]</sup>。因此,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  界面特性及其对反型层迁移率的影响, 一直是大规模和超大规模集成电路研究的重要内容<sup>[2-4]</sup>。众所周知, 界面态密度和固定电荷密度不仅与未饱和的悬挂键有关, 而且与金属杂质的玷污和其它缺陷有关<sup>[5-7]</sup>。离子轰击加退火, 最先是作为获得清洁表面而提出来的<sup>[8]</sup>。Kang 等人的研究表明, 通过薄二氧化硅层的  $\text{Ar}^+$  离子注入, 可有效吸除硅中的金属离子<sup>[9-12]</sup>; 而 Yun 等人的研究证明, 背面  $\text{Ar}^+$  离子注入产生的缺陷层能有效吸除重金属离子<sup>[13]</sup>。业已证明, 利用背面  $\text{Ar}^+$  轰击, 可降低肖特基势垒的势垒高度、减小 MOS 器件的栅氧化层固定电荷密度、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$  的界面态密度和界面应力, 增强  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  界面对热载流子注入的硬度, 从而改善器件性能<sup>[14-17]</sup>。

本研究是在制造 MOSFET 芯片后, 在室温下用低能量(550eV)氩离子束轰击芯片背面, 然后蒸铝退火。研究背面轰击对 MOSFET 的沟道电导、跨

导、阈值电压和载流子迁移率的影响。为探讨背面轰击对上述参数影响的原因, 本文还研究了轰击对界面态密度和固定电荷密度的影响。

## 2 实验

采用常规四掩模多晶硅栅自对准 MOS 工艺, 在电阻率为  $8\text{--}10\Omega \cdot \text{cm}$  的 p 型(100)单晶硅衬底上制造 n 沟 MOSFET 和电容器。MOSFET 的沟道长度和宽度分别为  $2\mu\text{m}$  和  $20\mu\text{m}$ , 电容器的面积为  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 。MOS 晶体管的栅氧化层和电容器的介质用氩稀释干氧在  $950^\circ\text{C}$  下氧化制备, 厚度约  $20\text{nm}$ 。 $1^\#$  片进行单峰沟道离子注入, 能量为  $45\text{keV}$ , 剂量是  $4 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ ;  $2^\#$  片进行双峰沟道离子注入, 能量分别为  $120$  和  $25\text{keV}$ , 剂量是  $1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。采用低压化学气相沉积(LPCVD)的方法淀积  $400\text{nm}$  的多晶硅栅并进行掺磷扩散。源区和漏区进行自对准砷离子注入, 能量为  $80\text{keV}$ , 剂量是  $4 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 。最后, 铝电极在形成气体( $\text{N}_2 + \text{H}_2$ )中进行  $420^\circ\text{C}$ 、 $20\text{min}$  的合金化。

芯片做好后, 置于国产 LD-1 型离子束镀膜机内, 在室温下用氩离子束轰击其背面  $15\text{--}45\text{min}$ , 轰

黄美浅 男, 1946 年出生, 副教授, 从事微电子学方面的教学和研究。

李观启 男, 1940 年出生, 教授, 从事微电子学方面的教学和研究。

曾绍鸿 男, 1940 年出生, 高级工程师, 从事微电子学方面的教学和研究。

击能量为 550eV, 离子束流密度为 0.5mA/cm<sup>2</sup>, 真空度为  $3.2 \times 10^{-3}$ Pa. 然后样品背面蒸铝, 并在 420℃下用氮气保护退火 20min.

采用 HP35665A 动态信号分析仪和 HP4145B 半导体参数分析仪测量 MOSFET 的 I-V 特性, 确定其阈值电压  $V_T$ 、跨导  $g_m$ 、沟道电导  $g_d$  和有效迁移率  $\mu_{eff}$ . 用 HP4284A 和 HP4140B 测量 MOS 电容器的高频  $C-V$  和准静态  $C-V$  曲线, 计算出其界面态密度和固定电荷密度. 所有测量均在室温、避光和电屏蔽的探针台上进行.

### 3 实验结果和讨论

线性区跨导( $g_m$ )、沟道电导( $g_d$ )、阈值电压( $V_T$ )和有效迁移率( $\mu_{eff}$ )的值直接从 HP 测量分析仪由测试图形提取得到. 图 1(a)和(b)分别给出线性区和饱和区的跨导与轰击时间的关系. 图中 1# 曲线的器件是单峰沟道离子注入, 其栅-源电压  $V_{GS}$  为 2V; 2# 曲线的器件是双峰沟道离子注入, 其栅-源电压  $V_{GS}$  为 3V. 由图可见, 随着背面 Ar<sup>+</sup>轰击时间的增加,  $g_m$  的值先增大, 然后减小; 而无论在线性区还是饱和区, 1# 器件的变化幅度较大. 我们知道, MOSFET 工作在线性区和饱和区时的跨导分别为<sup>[18]</sup>

$$g_{mL} = \frac{W\mu_n C_{ox} V_{DS}}{L} \quad (1)$$

和

$$g_{mS} = \frac{W\mu_n C_{ox}(V_{GS} - V_T)}{L} \quad (2)$$

式中  $L$  和  $W$  分别为沟道的长度和宽度;  $\mu_n$  为沟道电子迁移率;  $C_{ox}$  为栅氧化层的单位面积电容. 由式(1)和式(2)可见, 由于 Ar<sup>+</sup>背面轰击前、后器件尺寸和外加偏压不变, 因此轰击后引起  $g_m$  变化的主要因数是  $\mu_n$ 、 $C_{ox}$  和  $V_T$ .

图 2 给出线性区的沟道电导与轰击时间的关系. 由图可见, 沟道电导与轰击时间的关系与跨导相似,  $g_d$  也是先随着背面 Ar<sup>+</sup>轰击时间的增加而增大, 然后再减小. MOSFET 工作在线性区时的沟道电导为<sup>[18]</sup>

$$g_d = \frac{W\mu_n C_{ox}(V_{GS} - V_T - V_{DS})}{L} \quad (3)$$

由式(3)可见, 由于 Ar<sup>+</sup>背面轰击前、后器件尺寸和外加偏压不变, 因此轰击后引起  $g_d$  变化的主要因数

是  $\mu_n$ 、 $C_{ox}$  和  $V_T$ .

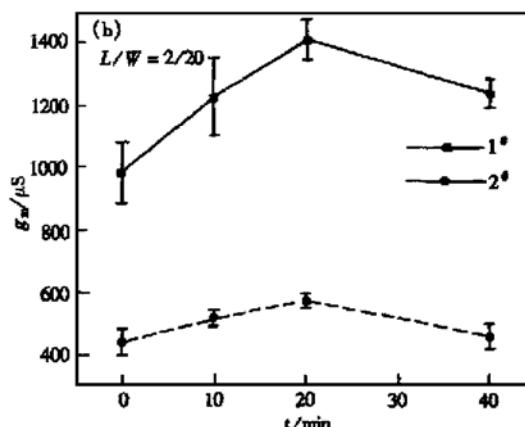
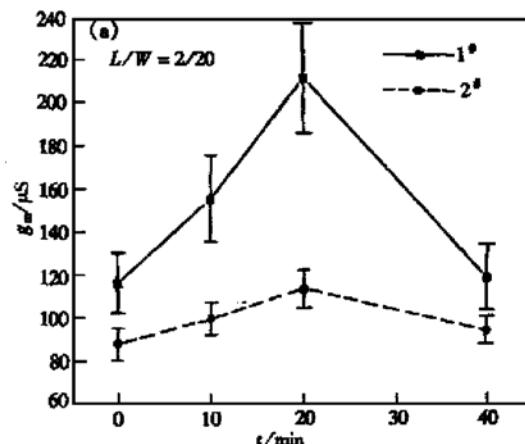


图 1 跨导与轰击时间的关系 (a) 线性区;

FIG. 1 Transconductance vs Bombardment Time for (a) Linear Region; (b) Saturation Region

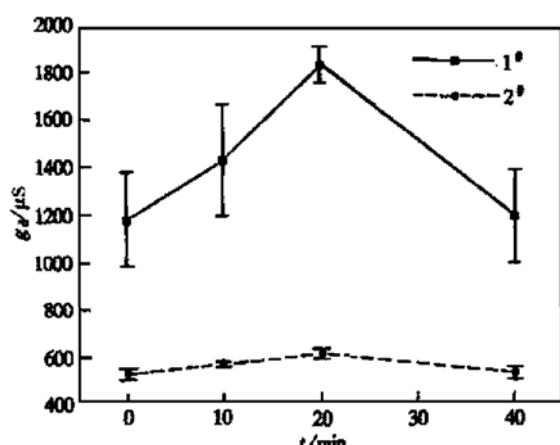


图 2 沟道电导与轰击时间的关系

FIG. 2 Channel Conductance vs Bombardment Time

图 3 给出有效迁移率随轰击时间的变化。由图可见, 随着背面  $\text{Ar}^+$  轰击时间的增加, 有效迁移率先增大, 然后再减小。MOSFET 的有效迁移率为<sup>[18, 19]</sup>

$$\frac{1}{\mu_{\text{eff}}} = \frac{1}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_S} \quad (4)$$

式中  $\mu_B$  是体内迁移率;  $\mu_S$  是表面迁移率。由于沟道反型层的载流子要经过沟道散射, 因此表面迁移率  $\mu_S$  小于体内迁移率  $\mu_B$ <sup>[19]</sup>。一般来说, 影响载流子表面迁移率的散射机构包括晶格振动引起的声子散射<sup>[20, 21]</sup>、电离杂质和氧化层固定电荷等电荷中心引起的库仑散射<sup>[22]</sup>以及表面粗糙度引起的散射<sup>[22-24]</sup>。综上所述, 背面  $\text{Ar}^+$  轰击后沟道有效迁移率的变化, 可能与栅氧化层固定电荷密度、 $\text{SiO}_2-\text{Si}$  界面态密度和界面应力引起的库仑散射和表面粗糙度散射有关。由图 3 还可看到, 由于  $1^\#$  器件的沟道杂质浓度较低, 因此其反型层电子的有效迁移率的变化较大。MOSFET 的有效迁移率又可表达为<sup>[18]</sup>

$$\frac{1}{\mu_{\text{eff}}} = \frac{LI_D}{WC_{\text{ox}}(V_{GS} - V_T)V_{DS}} \quad (5)$$

由式(5)可见, 由于  $\text{Ar}^+$  轰击前、后器件的尺寸和外加偏压不变, 因此轰击后引起  $\mu_{\text{eff}}$  变化的主要因数是  $C_{\text{ox}}$  和  $V_T$ 。

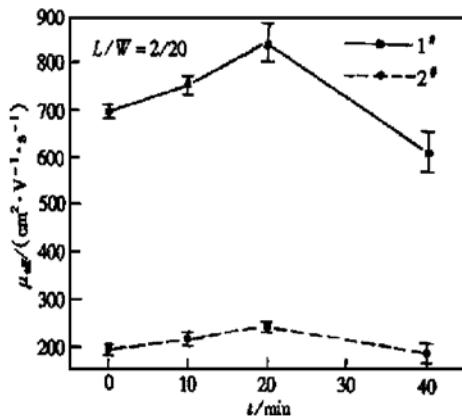


图 3 迁移率与轰击时间的关系

FIG. 3 Mobility vs Bombardment Time

上述讨论中,  $g_m$ 、 $g_d$  和  $\mu_{\text{eff}}$  都与  $V_T$  有关。图 4 给出阈值电压随轰击时间的变化。由图可见,  $\text{Ar}^+$  轰击后  $V_T$  与轰击时间的变化规律刚好与上述  $g_m$ 、 $g_d$  和  $\mu_{\text{eff}}$  相反; 随着背面  $\text{Ar}^+$  轰击时间的增加, 有效迁移率则先增大, 然后再减小。MOSFET 的  $V_T$  为

$$V_T = -Q_{ss}/C_{\text{ox}} + [2\epsilon_0\epsilon_s q N_A(V_B - V_{BS})]^{1/2}/C_{\text{ox}} + (kT/q)(\ln(N_A/n_i)) - V_{ms} \quad (6)$$

式中  $Q_{ss}$  为表面态电荷密度, 包括固定电荷、可动

电荷和界面态;  $N_A$  为衬底受主浓度。由式(6)可见, 影响  $V_T$  的主要因数为  $Q_{ss}$  和  $C_{\text{ox}}$ 。综上所述, 轰击后引起  $g_m$ 、 $g_d$ 、 $\mu_{\text{eff}}$  和  $V_T$  变化的主要因数是  $C_{\text{ox}}$  和  $Q_{ss}$ 。

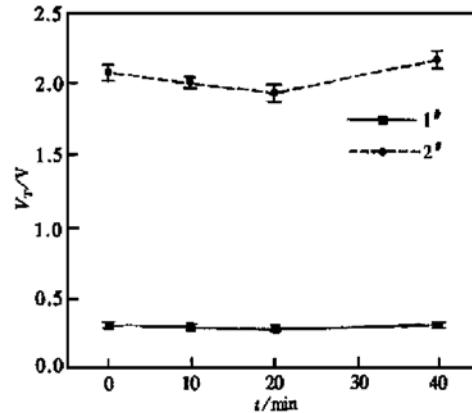


图 4 阈值电压与轰击时间的关系

FIG. 4 Threshold Voltage vs Bombardment Time

为探讨背面  $\text{Ar}^+$  轰击后 MOSFET 特性变化的原因, 图 5 给出与 MOSFET 栅氧化层厚度相同的

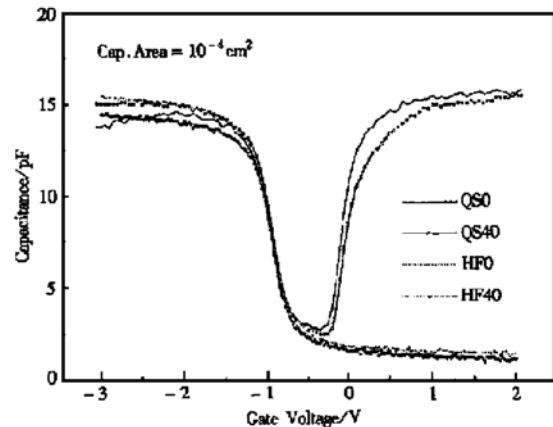


图 5 高频和准静态  $C-V$  曲线

FIG. 5 High Frequency and Quasi-Static State  $C-V$  Curve

MOS 电容器在背面  $\text{Ar}^+$  轰击前、后测量得到的典型高频和准静态  $C-V$  曲线。由图可见, 背面  $\text{Ar}^+$  轰击后单位面积电容  $C_{\text{ox}}$  和平带电压  $V_{FB}$  都发生变化。我们知道,

$$C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_0\epsilon_{\text{ox}}}{T_{\text{ox}}} \quad (7)$$

式中  $\epsilon_{\text{ox}}$  为二氧化硅的相对介电常数;  $T_{\text{ox}}$  为二氧化硅厚度。 $\text{Ar}^+$  背面轰击后  $C_{\text{ox}}$  的变化可能与栅二氧化硅的内部结构变化有关。

由高频和准静态  $C-V$  曲线可计算出离子束轰

击前、后的界面态密度和固定电荷密度, 其结果如图 6 所示。

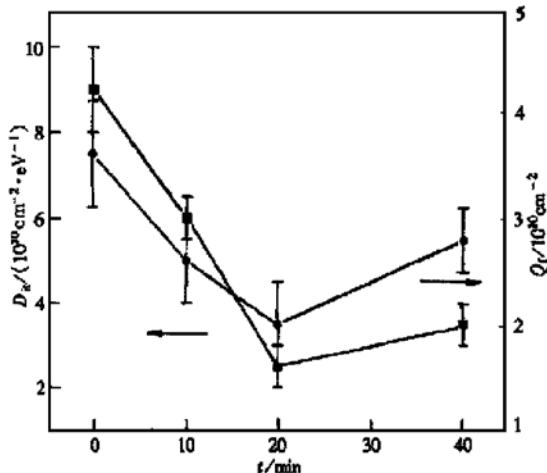


图 6 界面态密度和固定电荷密度与轰击时间的关系

FIG. 6 Interface State Density and Fixed Charge Density vs Bombardment Time

众所周知, 表面沟道迁移率低于体内是与界面态的俘获作用以及栅介质膜中固定电荷和界面缺陷的散射作用有关。背面 Ar 离子束轰击后, 背面轰击产生的损伤层会引入应力, 对氧化和扩散等工艺产生的应力起补偿作用, 使界面缺陷密度减小; 但过长时间的轰击将出现应力过补偿, 产生新的缺陷。此外, 背面轰击还能吸收重金属离子<sup>[13]</sup>, 从而改善 SiO<sub>2</sub>-Si 界面状况。因此, 经背面 Ar 离子束轰击后, 表面沟道载流子迁移率、沟道电导、跨导、阈值电压和电容的变化, 是界面态密度和固定电荷密度变化的结果。

## 4 结论

背面低能量氩离子轰击能改善 MOSFET 的特性。结果表明, 器件的沟道电导、跨导和沟道载流子迁移率先随轰击时间的增加而增大, 然后减小; 而其阈值电压先随轰击时间的增加而减小, 然后再增大。结果表明, 上述参数的变化是由于界面态密度和固定电荷密度变化的结果。

## 参考文献

- [1] E. H. Nicollian and J. R. Brews, MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, Wiley, New York, 1982.
- [2] A. Rothwarf, IEEE Electron Device Lett., 1987, **8**(10): 499.
- [3] C. L. Hung, J. V. Faricelli and A. D. Arora, IEEE Trans. Electron Devices, 1993, **40**(6): 1134.
- [4] C. L. Huang, W. Ting, D. L. Kwong et al., IEEE Electron Device Lett., 1991, **12**(9): 495.
- [5] P. F. Schmidt and L. P. Adda, J. Appl. Phys., 1974, **45**(4): 1826.
- [6] T. Sakurai and T. Sugano, J. Appl. Phys., 1981, **52**(4): 2889.
- [7] J. S. Kang and D. K. Schroder, J. Appl. Phys., 1989, **65**(8): 2974.
- [8] C. G. Scott and C. E. Reed, Surface Physics of Phosphors and Semiconductors, Academic Press, 1975.
- [9] K. D. Beyer and T. H. Yeh, J. Electrochem. Soc., 1982, **129**(11): 2527.
- [10] M. R. Ponponiak, T. Nagasaki and T. H. Yeh, J. Electrochem. Soc., 1977, **124**(11): 1802.
- [11] CHEN Chang-sheng, Chinese Journal of Semiconductors, 1992, **13**(3): 174[陈畅生, 半导体学报, 1992, **13**(3): 174].
- [12] W. D. Sawyer, J. Weber, G. Nanert et al., J. Appl. Phys., 1990, **68**: 6179.
- [13] B. H. Yun, Appl. Phys. Lett., 1981, **39**: 330.
- [14] LI Guan-qi, ZENG Yong-biao, WANG Jian-fei, HUANG Mei-qian and ZENG Shao-hong, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(11): 861[李观启, 曾勇彪, 王剑飞, 黄美浅, 曾绍鸿, 半导体学报, 1998, **19**(11): 861].
- [15] LI Guan-qi, ZENG Shao-hong and HUANG Mei-qian, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**(6): 464[李观启, 曾绍鸿, 黄美浅, 半导体学报, 1996, **17**(6): 464].
- [16] P. T. Lai, M. Q. Huang, X. Zeng et al., Appl. Phys. Lett., 1996, **68**(19): 2687.
- [17] M. Q. Huang, P. T. Lai, J. P. Xu et al., Microelectronics Reliability, 1998, **38**: 1407.
- [18] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., Wiley, New York, 1981.
- [19] S. A. Schwarz and S. E. Russek, IEEE Trans. Electron Devices, 1983, **ED-30**: 1634.
- [20] N. Arora, MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation, Springer-Verlag Wien, New York, 1993.
- [21] P. P. Guebels and F. van de Wiele, Solid-State Electron., 1983, **26**: 267.
- [22] S. Kawaji, J. Phys. Soc. Jpn., 1969, **27**: 908.
- [23] C. T. Sah, T. H. Ning and L. L. Tschoop, Surface Sci., 1972, **32**: 561.
- [24] Y. C. Cheng and E. A. Sullivan, Surface Sci., 1972, **34**: 717.

## Influence of Backsurface Ar<sup>+</sup> Bombardment on the Characteristics of n-MOSFET

HUANG Mei-qian, LI Guan-qi and ZENG Shao-hong

(Department of Applied Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Influence of backsurface Ar<sup>+</sup> bombardment on the characteristics of n-MOSFET have been investigated. A low energy (550eV) argon-ion-beam is applied to bombard the backside of n-MOSFET, thus the electrical characteristics of the threshold voltage, the transconductance, channel conductance and effective inversion layer carrier mobility of the devices can be improved. As the bombardment time increases, the threshold voltage decreases at first, and then increases; but the change tends of the transconductance, channel conductance and effective inversion layer carrier mobility are on the contrary. It is proved that the improvement of the parameters is due to the decrease of interface state density and fixed charge density.

**Key words:** backsurface Ar<sup>+</sup> bombardment; n-MOSFET

**PACC:** 7340; 7850; 8140; 8160

**Article ID:** 0253-4177(2001)06-0774-05

HUANG Mei-qian male, born in 1946, associate professor, is engaged in teaching and research on microelectronics.

LI Guan-qi male, born in 1940, professor, is engaged in teaching and research on microelectronics.

ZENG Shao-hong male, born in 1940, senior engineer, is engaged in teaching and research on microelectronics.