

N⁻掺杂浓度对小尺寸 nMOSFETs 热载流子寿命的影响*

张 焰 李瑞伟

(清华大学微电子所, 北京 100084)

摘要: 从模拟和试验二方面对 N⁻区的结构参数影响器件可靠性的规律进行了细致的研究。考虑到工艺条件, 主要讨论 N⁻区的掺杂浓度(N_{N^-})的变化对器件可靠性的影响。通过模拟和从实际工作中得到的结果, 对于 0.35—1.2 μm 器件, 我们将 N⁻区的掺杂浓度优化为 7×10^{17} — $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。利用优化结果进行试验生产, 并对器件寿命进行测量的结果表明, 沟道长度 0.8 μm 以上的均可以在 5V 的电源电压下可靠地工作 10 年(工业标准); 0.4 μm 的器件, 可以在 4V 的电源电压下达到 10 年的工作寿命(热载流子寿命)。

关键词: 热载流子; 寿命; MOS

EEACC: 0170N; 2560R

中图分类号: TN 386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)05-0469-04

Effect of Doping Concentration on Hot Carrier Reliability of Small-Sized nMOSFETs*

ZHANG Jiong and LI Rui-wei

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

Received 8 January 1999, revised manuscript received 5 March 1999

Abstract: The effect of doping concentration on the hot carrier reliability of small-sized nMOSFETs is presented. Considering the restriction of process situation, only the effect of N-type doping concentration on the lifetime of nMOSFETs is discussed. Based on simulation, 7×10^{17} — $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ was beneficial doping concentration to enhance the reliability of 0.35—1.2 μm nMOSFET. The testing results confirm this conclusion. It is shown that nMOSFET with channel length larger than 0.8 μm could be used for 10 years under 5V, and one with channel length of 0.4 μm could reach 10 years of lifetime under 4V.

* 国家“八五”和“九五”计划资助项目[Project Supported by the State Eighth-Five and Ninth-Five year Plan].

张 焰 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。

1999-01-08收到, 1999-03-05定稿

Key words: hot carrier; lifetime; MOS
EEACC: 0170N; 2560R
Article ID: 0253-4177(2000)05-0469-04

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^[1-3]. 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. 虽然对大于 $0.35\mu\text{m}$ 的CMOS器件,在总体上均采用LDD结构,但是,我们对N⁻区的结构参数变化对器件可靠性影响的规律的了解甚为模糊. 在本文的工作中,我们将从模拟和试验两方面对N⁻区的结构参数进行细致的分析.

N⁻区的结构参数主要包括N⁻区的长度(L_{N^-}),N⁻区的掺杂浓度(N_{N^-})和N⁻区的深度(X_{N^-})^[4]. 对于深亚微米器件来说,考虑到穿通电压等的限制,N⁻区的深度(X_{N^-})一般在 $0.1\mu\text{m}$;从工艺实现的角度来看,通过SPACER的长度可以调节 L_{N^-} ,但是限于工艺条件,这样的调节也不能达到很好的效果;而通过对N⁻区的注入能量和剂量的调节及适当的退火工艺则可以非常方便地控制 X_{N^-} 和 N_{N^-} . 所以我们主要讨论N⁻区的掺杂浓度(N_{N^-})的变化对器件可靠性的影响.

2 MEDICI 的模拟结果

在进行优化时,我们主要借助于TMA-MEDICI二维器件模拟软件^[5],并综合考虑了不同N⁻区参数条件下的沟道电场和饱和电流因素,从而为器件结构优化提供一些指导性的原则. 在上述优化结果的指导下,我们进行工艺流水,对模拟的结果进行了验证.

从前面的讨论我们可以看到,由于多方面因素的制约,N⁻区(SPACER)长度和结深的可供调节的余量都是有限的,所以我们考虑对N⁻区的掺杂浓度作较大范围的调整. 从文献的报道我们也能看到,为了提高器件的热载流子寿命,研究人员对N⁻区的考察范围非常广,甚至将N⁻区调节成“本征区”(即沟道-漏结为PIN结构). 但是,从实际生产的角度看,比如器件的驱动能力不能太低,我们将在常见的 $10^{17}\text{--}10^{18}/\text{cm}^3$ 范围进行考察.

图1给出我们对 $1.0\mu\text{m}$ 器件的模拟结果. 从图中我们可以看到,当N⁻区的掺杂浓度为 $1.0\times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时,沟道电场的峰值出现在N⁻N⁺结处,而掺杂浓度为 $3.0\times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时,峰值电场转移到PN⁻结面处. 掺杂浓度介于上述二者之间的,峰值电场处于N⁻区中,并且有较大的降低,表现出漏轻掺杂区对沟道电场的限制作用,所以我们在掺杂浓度的选择上,应该尽量选取在上述范围内.

对于不同沟道长度的器件,峰值电场的变化趋势与 $1.0\mu\text{m}$ 器件的基本相同,但更细致的模拟结果表明(见图2),随着沟道长度的降低,为了得到最低的峰值电场,应该适当提高N⁻区的掺杂浓度.

为了最终确定我们试验性流水的N⁻区掺杂浓度,我们还应该考虑到N⁻区掺杂浓度对器件驱动电流的影响. 图3

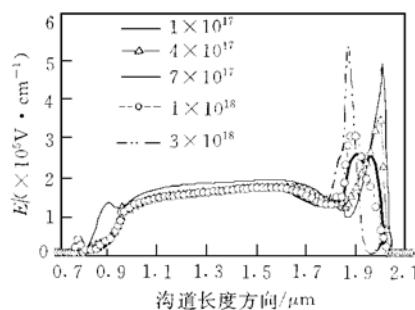


图1 TMA-MEDICI 模型的 $L=1.0\mu\text{m}$ 的 NMOS 在不同的 N⁻ 区掺杂浓度条件下
的表面沟道电场分布
($V_d=6\text{V}$, $V_g=2.5\text{V}$); $T_{ox}=10.0\text{nm}$;
 $L_{N^-}=0.15\mu\text{m}$; $X_{N^-}=0.15\mu\text{m}$ 棚位于
0.9—1.9μm 的区域.

FIG. 1 Simulated Surface Electrical Potential
of $L=1.0\mu\text{m}$ NMOS at Different Doping
Concentration of N⁻ Region at
 $V_d=6\text{V}$, $V_g=2.5\text{V}$ by TMA-MEDICI;
 $T_{ox}=10.0\text{nm}$; $L_{N^-}=0.15\mu\text{m}$;
 $X_{N^-}=0.15\mu\text{m}$; Gate Located
Between 0.9—1.09μm.

给出对应的模拟结果。从模拟的数值来看,不同沟道长度的器件饱和电流均随N⁻区掺杂浓度的降低而减小,当掺杂浓度从 $1.0 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 降低到 $1.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时,饱和电流值降低约1倍。但是,从图中可以看到,饱和电流的变化速率在 1.0×10^{17} — $5.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时较大,但是当高于 $5.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时则变化不大。因此,从器件的驱动能力的角度考虑,N⁻区的掺杂浓度应该尽可能地选择在 $5.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以上,而且这样的选择也符合最小沟道峰值电场对浓度的要求。

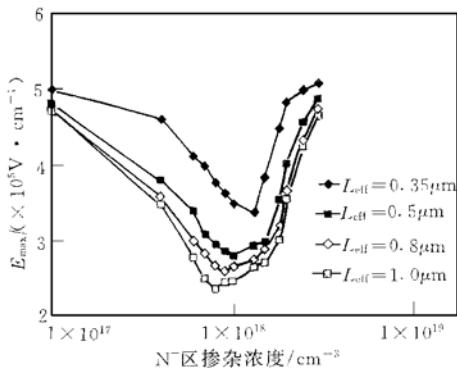


图2 TMA-MEDICI 模拟的不同沟道长度下的沟道峰值电场与N⁻区的掺杂浓度之间的关系
($V_d = 6$, $V_g = 2.5$ V); 其中 $L_{eff} = 0.35\mu\text{m}$ 器件的 $X_{N^-} = 0.10\mu\text{m}$, 其它沟道长度器件的 $X_{N^-} = 0.15\mu\text{m}$; $T_{ox} = 10.0\text{nm}$.

FIG. 2 Simulated Results of Channel Peak Electrical Field vs Doping Concentration of N⁻ Region at $V_d = 6$, $V_g = 2.5$ V by TMA-MEDICI; the $L_{eff} = 0.35\mu\text{m}$ Devices with $X_{N^-} = 0.10\mu\text{m}$ while other Devices with $X_{N^-} = 0.15\mu\text{m}$; $T_{ox} = 10.0\text{nm}$.

3 器件制备和结构优化实验

实验用的器件由我所1μm工艺线制备。P型(100)硅片衬底电阻率为30—50Ω·cm,我们制备了W/L从20μm/0.7μm到20μm/2.0μm的LDD-NMOS器件,LDD的侧壁(SPACER)长约150nm,器件阈值0.6—0.7V。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:20keV)和防穿通(B⁺剂量: $1.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 能量:120keV)。栅氧的厚度为10nm和20nm,分别对应结深0.15μm和0.25μm。

在总体工艺方案上,我们确定为:

- (a) 选择N阱CMOS工艺方案;
- (b) 采用全离子注入掺杂、全正胶光刻、全干法刻蚀工艺;
- (c) 尽量采用低温、红外快速退火技术;
- (d) 器件沟道区次表面防穿通注入技术。

从前面的模拟工作中,我们知道,为了提高MOS器件的热载流子可靠性,应该将N⁻区的掺杂浓度控制在一定的范围内。在实际流水中,我们对N⁻区的注入剂量进行了“撒网”实验,希望通过实际流水结果

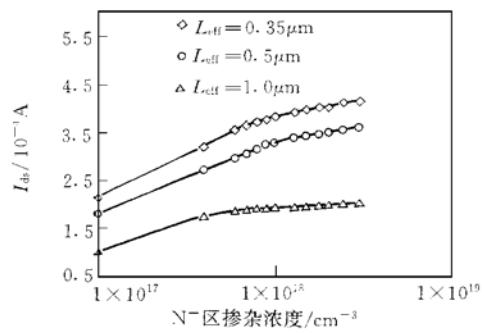


图3 TMA-MEDICI 模拟的不同沟道长度下的驱动电流($V_d = V_g = 2.5$ V)与N⁻区的掺杂浓度之间的关系
其中 $L_{eff} = 0.35\mu\text{m}$ 器件的 $X_{N^-} = 0.10\mu\text{m}$, 其它沟道长度器件的 $X_{N^-} = 0.15\mu\text{m}$;
 $T_{ox} = 10.0\text{nm}$.

FIG. 3 Simulated Drive Current of Devices with Different Channel Lengths vs Doping Concentration of N⁻ Region at $V_d = V_g = 2.5$ V by TMA-MEDICI the $L_{eff} = 0.35\mu\text{m}$ Devices with $X_{N^-} = 0.10\mu\text{m}$ while other Devices with $X_{N^-} = 0.15\mu\text{m}$; $T_{ox} = 10.0\text{nm}$.

验证模拟的结论.

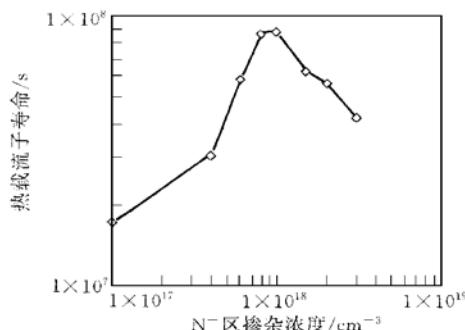


图4 具有不同 N⁻ 区掺杂浓度的 LDD-NMOSFET 的热载流子寿命比较
 $L_{eff} = 0.8\mu m$; 寿命测量条件: $V_d = 6V$, $V_g = 2.5V$.

FIG. 4 The Hot-Carrier Lifetime of LDD-NMOSFET with Different Doping Concentration
Measuring Condition: $V_d = 6V$, $V_g = 2.5V$.

1.2 μm 器件, 我们发现当 N⁻ 区的掺杂浓度为 8.0×10^{17} — $1.0 \times 10^{18}/cm^2$ 时, 样品的热载流子寿命最长.

进一步对试验生产出样品(沟道长度为 0.4—2.0 μm)测量了的最大衬底电流应力条件下的热载流子寿命和器件的电压工作容限: 沟道长度 0.8 μm 以上的均可以在 5V 的电源电压下可靠地工作 10 年(工业标准); 结合实测的结果和合理的推测, 我们制备的 0.35 μm 的器件, 可以在 3.7V 的电源电压下达到 10 年的工作寿命, 达到了预期的目的.

4 结论

通过模拟和从实际工作中得到的结果, 对于 0.35—

1.2 μm 器件, 我们发现当 N⁻ 区的掺杂浓度为 8.0×10^{17} — $1.0 \times 10^{18}/cm^2$ 时, 样品的热载流子寿命最长.

从图中的结果可以看到, 当 N⁻ 区的掺杂浓度为 8.0×10^{17} — $1.0 \times 10^{18}/cm^3$ 时, 器件的热载流子寿命最大, 这与我们在上一节的模拟结果是一致的, 所以, 我们将 N⁻ 区的掺杂浓度设在上述范围内.

从图中我们还可以看到, 当 N⁻ 区掺杂浓度高于和低于上述范围时, 样品的热载流子寿命均呈下降的趋势, 然而, N⁻ 区浓度高的样品的寿命下降的趋势较为缓慢, 因此, 适当提高 N⁻ 区的掺杂浓度可以提高器件的驱动能力, 而对器件的寿命影响小一些.

参 考 文 献

- [1] S. A. Abbas and R. C. Dockerty, IEDM Tech. Dig., 1975: 35—38.
- [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. Electron. Mater., 1997, 6: 65.
- [4] 张炯, 清华大学博士学位论文, 第三章, 1998年10月[ZHANG Jiong, Ph. D Thesis of Tsinghua University, Chap. 3, October 1998(in Chinese)].
- [5] TMA-MEDICI Version 2.0, Technology Modeling Associates, Inc., 1994.