

亚 50nm 双栅 MOS 场效应晶体管的 流体动力学模拟^{*}

刘弋波 刘恩峰 刘晓彦 韩汝琦

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 利用自主开发的流体动力学模拟软件对亚 50nm 沟长双栅 MOS 场效应晶体管的特性进行了模拟, 比较了不同沟道长度时电子温度和漂移速度沿沟道方向的分布, 并讨论了器件的短沟效应。

关键词: 流体动力学; 双栅 MOSFET; 阈值电压; 短沟效应; 电子温度; 漂移速度

PACC: 9530L

中图分类号: TN322⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0144-04

1 引言

通过缩小器件特征尺寸和增大芯片面积, CMOS VLSI 产业沿用标准的体硅 CMOS 技术按照摩尔定律前进了将近四十年, 现在已开始进入纳米尺度. 但是由于受到诸多因素尤其是短沟效应^[1]的限制, 传统 MOS 器件的按比例缩小将在不久的将来走到尽头, 达到它的极限尺寸. 为了能够继续发展, 人们开始研究新的器件结构和材料, 其中双栅结构 MOS 场效应晶体管被认为是未来最有希望成为传统 MOSFET 缩小到极限时的替代解决方案之一^[2]. 双栅 MOSFET 有上下两个栅电极耦合到导电硅膜, 增强了栅对空间电荷的控制能力, 能有效抑制短沟效应带来的不良影响. 当栅压达到阈值电压以后, 在硅膜的上下表面都能形成导电沟道, 甚至栅压足够大时, 能使整个硅膜反型^[3]. 由于体内电子空穴不受表面散射的影响, 双栅 MOSFET 具有较高的载流子场效应迁移率, 因此器件跨导高, 源漏电流大, 具有很好的亚阈值特性. 所以双栅 MOSFET 很有可能应用于未来深亚微米超大规模集成电路. 本文利用自主开发的流体动力学模拟软件对亚 50nm 双栅 MOSFET 的特性进行了模拟, 分析了阈值电

压与亚阈值斜率随沟道长度的变化, 比较了不同沟长时电子温度和漂移速度沿沟道方向的分布, 并讨论了器件的短沟效应。

2 流体动力学模拟

器件尺寸的不断缩小, 尤其是进入深亚微米以后, 器件内部电场很强, 会带来一些非局域/非本地运输的问题, 比如载流子的速度过冲现象^[4], 这时漂移扩散模型 (DD) 不再适用. 而流体动力学模型 (HD) 采用的是玻尔兹曼方程的前三阶近似^[5], 与 DD 模型相比多了一个描述载流子能量运输的能量平衡方程, 因此可以提高模拟精度, 甚至能够和蒙特卡罗方法相媲美, 所花费的时间却相对很少.

我们自主开发的二维流体动力学模拟软件采用全 HD 模型, 在载流子的平均能量中没有忽略掉动能项, 因此包含了更多的物理效应, 物理意义明确. 在平台中建立了多种载流子迁移率模型供用户选择. 为了适于模拟超深亚微米器件结构, 采用了简单、稳定、易行的双量子修正的办法. 器件模拟中采用的是三角网格, 能适应比较复杂的器件外形结构, 并有利于进行局部优化. 另外采用了新的猜值方法, 加速了收敛, 提高了求解过程的稳定性. 在数值计算

^{*} 国家重点基础研究专项经费资助项目 (No. G20000356)

刘弋波 男, 1977 年出生, 硕士研究生, 主要从事 SiGe 异质结场效应晶体管的设计与模拟.

中,用户可以根据不同的条件分别选取 Newton 法或 Gummel 法.该软件已经成功地模拟了弹道二极管、BJT、体硅 MOS、SOI 等多种器件.

3 双栅 MOSFET 模拟结果

本文所模拟的双栅 MOSFET 为对称型 n 沟器件.如图 1 所示,上下栅电极接同一电压 V_g ,栅氧厚度均为 2nm,硅膜厚度为 10nm,栅与源漏的交叠为 1nm,沟道长度从 50nm 至 20nm,衬底掺杂浓度为 $10^{17}cm^{-3}$.采用固定电流法提取阈值电压.

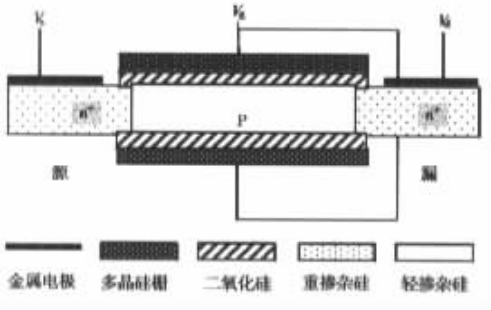


图 1 双栅 MOSFET 示意图

Fig.1 Double-gate MOSFET

图 2、3 分别为模拟得到的沟长 50nm 双栅 MOSFET 的转移特性和输出特性.对应漏源偏压 $V_{DS}=0.05V$ 时的阈值电压为 0.217V,亚阈值斜率为 64mV/dec,器件在沟长 50nm 下仍然具有良好的特性.

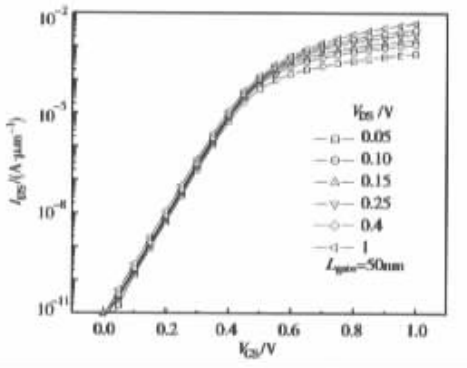


图 2 50nm 双栅 MOSFET 转移特性

Fig.2 Transfer characteristic of 50nm double-gate MOSFET

图 4 为模拟得到的不同沟道长度双栅 MOSFET 在漏源偏压 $V_{DS}=0.05V$ 时的转移特性.

从图中可以看到,随着沟道长度的缩短,器件的亚阈值特性明显变差.

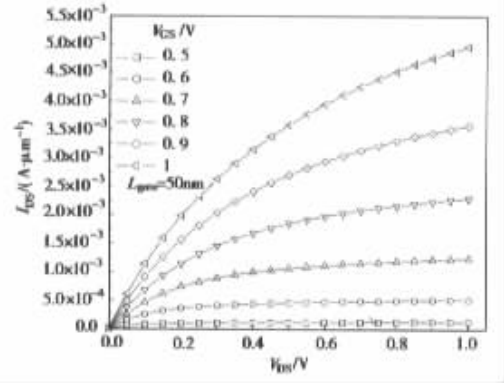


图 3 50nm 双栅 MOSFET 输出特性

Fig.3 Output characteristic of 50nm double-gate MOSFET

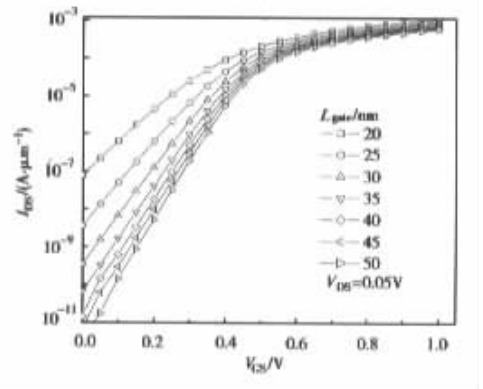


图 4 不同沟长双栅 MOSFET 转移特性

Fig.4 Transfer characteristics for double-gate MOSFET with different channel lengths

图 5 为从模拟结果中提取出的双栅 MOSFET 在漏源偏压 $V_{DS}=0.05V$ 时阈值电压和亚阈值斜率随沟道长度的变化.可以看出,随着沟长的缩短,器件阈值电压开始降低,而且沟长越短,阈值电压下降越快,短沟效应越明显.这是由于沟长变短后,栅对空间电荷的控制能力减弱所造成的.另外随着沟道长度的变短,亚阈值斜率迅速增大,器件的开关特性变坏.

图 6 为模拟得到的不同沟长双栅 MOSFET 靠近硅膜表面处沟道电子的温度分布,所加偏压为 $V_{GS}-V_{th}=V_{DS}=0.8V$.横坐标为归一化的沟道电子所在位置.由于强场下载流子能量大大提高,不再与晶格处于热平衡,载流子温度要高于晶格温度,而且

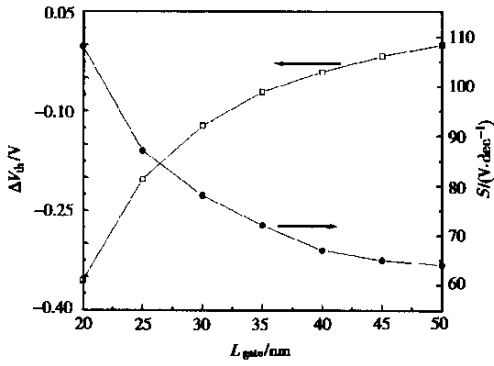


图 5 双栅 MOSFET 阈值电压与亚阈值斜率

Fig. 5 Threshold voltage and subthreshold swing of double-gate MOSFET

电场越强,载流子温度越高.因此可以看到在漏区的电子温度明显高于源区,而且器件沟道越短,场强越大,电子温度越高,相应的能量越高.而在 DD 模型中是不求解载流子温度的,所以观察不到这些现象.

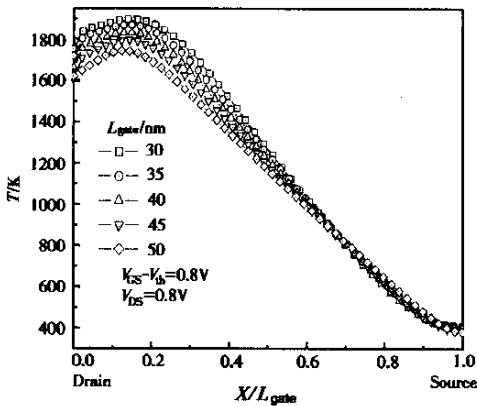


图 6 双栅 MOSFET 沟道电子温度分布

Fig. 6 Distribution of electron temperature in the channel of double-gate MOSFET

图 7 为模拟得到的不同沟长双栅 MOSFET 靠近硅膜表面处沟道电子的漂移速度分布,所加偏压同图 6.当器件尺寸缩小以后,载流子的渡越时间与能量弛豫时间以及动量弛豫时间可以相比拟时,已经是一个非局域/非本地的输运问题,以前大尺寸条件下的局域概念和 DD 模型已不再适用,这时需要用流体动力学模型来求解.从图中可以看到,电子从源流向漏的过程中存在漂移速度过冲,此后虽然电场依然很强,但经过多次的碰撞散射后,电子的漂移速度又趋于饱和.另外沟道长度越短,器件内场强越

大,过冲出现的越早和越显著.

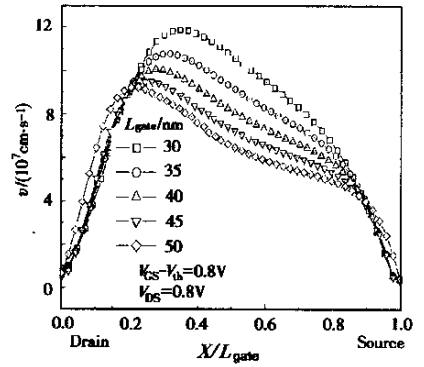


图 7 双栅 MOSFET 沟道电子漂移速度分布

Fig. 7 Distribution of electron drift velocity in the channel of double-gate MOSFET

4 总结

双栅 MOS 场效应晶体管由于能有效地抑制短沟效应以及具备一些其它的优良性质,而受到人们的高度重视和广泛关注,并极有希望应用于未来的深亚微米超大规模集成电路.本课题组自主开发的流体动力学模拟软件采用全 HD 模型,考虑和包含了多种物理效应,并采用新的猜值方法和加入双量子修正,成功地模拟了亚 50nm 双栅 MOSFET 等多种新结构器件,为以后研究超深亚微米器件结构提供了有力的辅助工具.

参考文献

- [1] Wong H S P, Frank D J, Solomon P M. Nanoscale CMOS. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(4): 537
- [2] Jeong M, Wong H S P. High performance double-gate device technology: challenges and opportunities. Proceedings of International Symposium on Quality Electronic Design, 2002: 492
- [3] Wang Xiaohui, Tang Tingao, Huang Yiping. An accurate dual gate MOSFET's 2-D potential distribution and analytical model of V_{th} . Research & Progress of SSE, 1994, 14(4): 328
[王小晖, 汤庭鳌, 黄宜平. 双栅 MOS 场效应管精确的二维电势分布与 V_{th} 的解析模型. 固体电子学研究与发展, 1994, 14(4): 328]
- [4] Li Zhijian, Zhou Runde. ULSI device circuit and system. Beijing: Science Press, 2000: 37 [李志坚, 周润德. ULSI 器件电路与系统. 北京: 科学出版社, 2000: 37]
- [5] Rudan M, Odeh F. Multi-dimensional discretization scheme for the hydrodynamic model of semiconductor equations.

COMPEL, 1986, 5(3):149

Hydrodynamic Simulation of Sub 50nm Double Gate MOSFET*

Liu Yibo, Liu Enfeng, Liu Xiaoyan and Han Ruqi

(*Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The performance of sub 50nm double gate MOSFET with different channel-length is simulated by the hydrodynamic simulation software developed. The distribution of electron temperature and drift velocity is compared in the channel direction. The short channel effect is also analyzed.

Key words: hydrodynamic; double gate MOSFET; threshold voltage; short channel effect; electron temperature; velocity

PACC: 9530L

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0144-04

* Project supported by the Special Funds for Major State Basic Research Projects(No. G20000356)

Liu Yibo male, was born in 1977, MS candidate. His research interests focus on the design and simulation of SiGe heterojunction field effect transistor.

Received 16 September 2002, revised manuscript received 17 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics