

# 极细沟道 NMOSFET 中的大幅度 随机电报信号噪声<sup>\*</sup>

卜惠明 施 毅 顾书林 袁晓利 吴 军 韩 平 张 荣 郑有料

(南京大学物理系, 南京 210093)

**摘要:** 研究了极细沟道 NMOSFET 器件的随机电报信号噪声(RTS)的特征. 首次在室温下观测到了大幅度(大于60%)的 RTS, 发现当器件工作在弱反型区时, RTS 幅度基本与温度和栅压无关. 对 RTS 的动力学机制的分析及数值模拟表明, 载流子数涨落与迁移率涨落引起的 RTS 的幅度随着沟道宽度的减小而增加, 当沟道宽度减小至40nm 以下时, 由荷电陷阱对沟道载流子散射而产生的迁移率涨落对细沟道中 RTS 幅度的影响起主导作用.

**关键词:** 噪声; 随机电报信号; MOSFET

**PACC:** 7270; 7390; 7215N

**中图分类号:** TN302    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-4177(2000)05-0465-04

## Characteristics of Random Telegraph Signals in NMOSFETs with Ultra Narrow Channels<sup>\*</sup>

BU Hui-ming, SHI Yi, GU Shu-lin, YUAN Xiao-li, WU Jun,  
HAN Ping, ZHANG Rong and ZHENG You-dou

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Received 9 May 1999, revised manuscript received 19 October 1999

**Abstract:** Random telegraph signals (RTSs) in NMOSFETs with ultra narrow channels was investigated. RTS with large amplitude ( $> 60\%$ ) has been observed at room temperature for the first time. The amplitude of RTS is almost independent of the measuring temperature and gate bias when the device is operated in a weak inversion. The observations suggest that the amplitude of RTSs caused by mobility fluctuation and carrier number fluctuation will increase with the reduction of the channel width. Furthermore, the numerical simulation proves that the mobility fluctuation of carriers plays a predominant

\* 国家自然科学基金资助课题(19974033)[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 19974033].

卜惠明 男, 1975年出生, 硕士研究生, 现从事低维半导体器件研究.

施 毅 男, 1962年出生, 教授, 目前主要从事低维半导体物理与器件研究.

1999-05-09收到, 1999-10-19定稿

role when the channel width is below 40nm.

**Key words:** noise; random telegraph signal; MOSFET

PACC: 7270; 7390; 7215N

Article ID: 0253-4177(2000)05-0465-04

## 1 引言

随着大规模硅集成电路的发展,器件的线宽已经进入亚微米的领域并正向纳米电子学迈进。在这样小的尺寸下,沟道电导的涨落现象越来越明显,并将严重影响器件的可靠性。称之为随机电报信号噪声(RTS)的电导开关涨落常出现在亚微米MOSFET源漏电流中,是MOSFET中主要的低频 $1/f$ 噪声源<sup>[1]</sup>。而且,随着器件尺寸的进一步减小,RTS的幅度越来越大。RTS是由于栅氧化层陷阱对沟道中载流子的俘获和发射而产生,因此它也为研究氧化层陷阱提供了有力的分析手段<sup>[1-7]</sup>。

对RTS的研究已有许多报道,其中大部分集中在亚微米MOSFET常规器件中。报道的RTS幅度一般在1%—5%之间,而且是在液氮温度以下进行观测。最近,Ishikuro等在极低温度下(1.5K)在对分裂栅MOSFET研究中观察到了大幅度的(~90%)RTS<sup>[8]</sup>。以往的报道中通常将电导的变化归因于弱反型的沟道中载流子数的涨落或迁移率的涨落,但对两种机制如何作用还没有统一的认识。本文研究了极细沟道的NMOSFET中的噪声,首次在室温下观测到了大幅度的RTS,同时对RTS幅度与温度和栅压的变化依赖关系进行了测试和分析,讨论了细沟道MOSFET中产生RTS的两种机制并进行了数值模拟和讨论。

## 2 实验

图1是进行实验测量的细沟道NMOSFET的俯视示意图。器件采用SOI衬底。为了获得超细沟道,首先

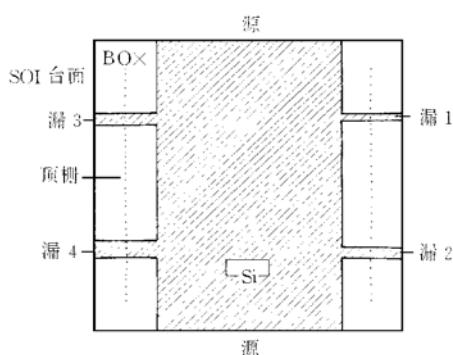


图1 极细沟道 NMOSFET 的俯视示意图

FIG. 1 Schematic Top View of NMOSFET  
with Ultra Narrow Channels

通过热氧化把顶层的硅减薄至20nm,然后用电子束光刻获得各种沟道图形,使宽度以25nm为步长从1μm逐渐减小至零。虽然各步工艺过程给设计宽度带来系统误差,但仍可以获得宽度逐渐变化的沟道。这里采用了各向异性腐蚀刻蚀方法形成沟道,这种方法可有效控制光刻带来的边缘粗糙<sup>[8]</sup>。对于栅、源和漏区的制备均采用常规的MOS工艺。

RTS的测量采用HP54810存储示波器和EG&G PA970低噪声电流放大器。为了降低测量系统的噪声,源漏电压和栅电压均用干电池作为电源。该系统测量温度范围在80—300K之间。

## 3 结果与讨论

图2所示的是室温下测量的不同宽度细沟道器件中的漏电流与栅压的特性曲线。随着沟道宽度的减小,器件的强反型区电流逐渐下降。当沟道宽度减小至沟道截断时,电流趋于零。器件的强反型区电流在μA量级,未开启电流保持在pA量级,具有很好的开启特性。

图3所示的是沟道最细的器件(设计沟道宽度为25nm)在不同温度下所测量的RTS噪声曲线。这里,漏

电压  $V_{ds} = 5\text{mV}$ , 高电流态的源漏电流  $I_d = 50\text{nA}$ 、栅压  $V_g = 500\text{mV}$ . 可以看到, 漏电流在两个分立的电流水平上变化. 实验测量数据统计显示处于高电流态与处于低电流态的占据时间服从泊松分布, 这表明电流变化是由 RTS 引起的<sup>[2]</sup>. 实验所观测到的电流的二级分立现象也表明起作用的距离沟道较近的氧化层陷阱仅有一个激活状态. 值得注意的是, 室温下 RTS 的相对幅度超过 60%, 这在以往的报道中从未有过. 事实上, 由于沟道电流波动太大, 器件此时已无法正常工作. 进一步的测量显示 RTS 的幅度受温度影响不大, 当样品测量温度从 300K 降至 100K 时, RTS 的幅度仅从 60% 增至 70%. 同时, 从图 4 中可以看出 RTS 的幅度几乎不随栅压改变而变化. 由于这里器件工作在弱反型区, 当栅压从 400mV 增至 500mV 时, 从图 2  $I_d$ - $V_g$  特征曲线可知沟道中载流子浓度将上升很快. 这一实验现象反映出目前细沟道的器件中 RTS 的幅度与沟道中载流子浓度无明显的依赖关系. 此外, 我们在其它的窄沟道器件中也观测到了幅度在 1%—10% 之间的 RTS 噪声.

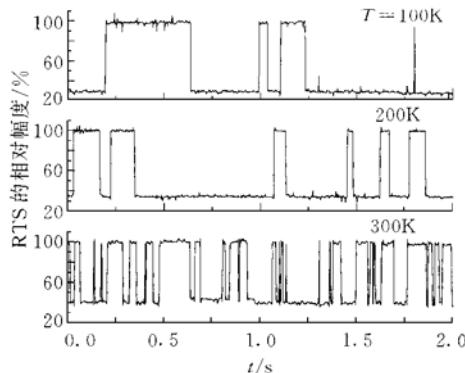


图3 不同温度下 RTS 的相对幅度

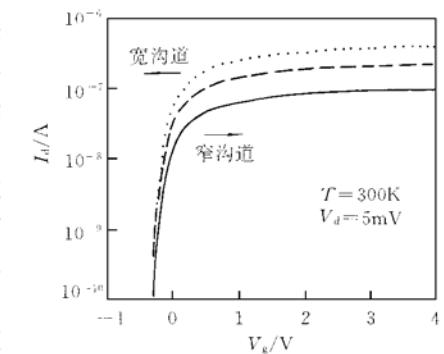
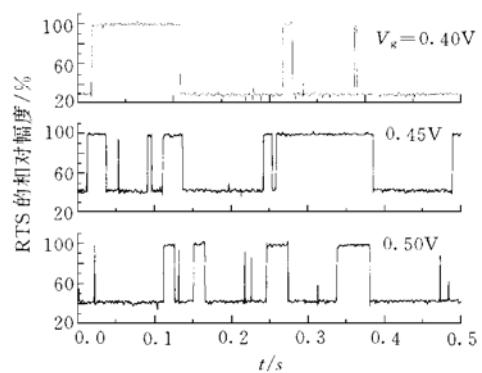
 $(V_g = 500\text{mV}, V_{ds} = 5\text{mV})$ FIG. 3 Relative Amplitude of RTS at Different Temperature( $V_g = 500\text{mV}, V_{ds} = 5\text{mV}$ )图2 极细沟道 NMOSFET 的  $I_d$ - $V_g$  特性FIG. 2  $I_d$ - $V_g$  Characteristics of NMOSFETs

图4 不同栅压下 RTS 的相对幅度

 $(T = 300\text{K}, V_{ds} = 5\text{mV})$ FIG. 4 Relative Amplitude of RTS Under Different Gate Bias Voltage( $T = 300\text{K}, V_{ds} = 5\text{mV}$ )

靠近沟道的栅氧化层陷阱俘获或发射电子时将引起沟道电势的局部涨落, 调制了沟道电导, 从而产生 RTS 噪声<sup>[1]</sup>. 当沟道宽度变得很窄时, 荷电陷阱引起的势能改变将会影响几乎整个沟道, 导致 RTS 的幅度增大. 而且, 随着器件工作温度的降低, 参与输运的电子浓度下降, 也会导致 RTS 幅度略有增大. 特别当器件工作在弱反型区时, 由于电势屏蔽较弱, 这种涨落效应更加明显.

这里, 对近似为准一维系统的细沟道中引起 RTS 的载流子数涨落和迁移率涨落两种机制进行了数值模拟. 通常, RTS 的相对幅度可以写成:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta \mu}{\mu} \quad (1)$$

式(1)中第一项对应于沟道中载流子数的变化, 可以进一步写为<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\alpha \beta q}{WL(C_{ox} + C_{it} + C_d + \alpha \beta Q_n)} \quad (2)$$

其中  $\alpha$  为常数, 器件工作在弱反型区时  $\alpha=1$ , 当器件工作在强反型区时,  $\alpha=0.5$ ;  $\beta=q/(kT)$ ;  $W$  与  $L$  分别是器件的有效宽度与长度;  $C_{ox}$ 、 $C_b$ 、 $C_d$  分别表示单位面积的氧化层电容、界面电容、耗尽区电容;  $Q_n$  为反型层电荷密度.

式(1)中第二项对应于沟道中载流子迁移率的变化, 可以写成:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\int_0^{2\pi} \left| \int \Psi^* V \Psi dQ \right|^2 \rho(E_{i,j}) d\theta}{\int_0^{2\pi} \left| \int \Psi^* V \Psi dQ \right|^2 \rho(E_{i,j}) d\Omega} \quad (3)$$

其中  $\tau$  为沟道中电子平均自由时间;  $\Psi$  为量子线中的电子波函数;  $\rho(E_{i,j})$  为准一维系统能态密度;  $V$  为考虑屏蔽后的陷阱散射势. 在各种散射机制中, 低维系统与三维系统的不同主要在于电子的初态、末态以及态密度的差异. 对准一维系统而言, 库仑散射的结果是使电子沿沟道方向向前或向后散射.

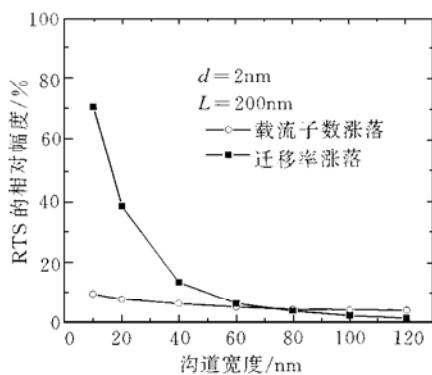


图5 载流子数涨落与迁移率涨落两种机制中

RTS 幅度与沟道宽度关系的模拟曲线

FIG. 5 Simulation of RTS Amplitude as the Function of Channel Width, Arising from the Change of Electron Density and Mobility, Respectively

60%) 几乎不随温度和栅压而改变. 这一现象可以通过极细沟道中迁移率涨落对沟道电导的影响占主导作用来加以解释, 随后进行的数值模拟也证实了这一结论.

致谢 本文的工作得到了日本东京大学生产技术研究所集成器件工程实验室以及南京大学物理系固体能耗实验室的协助, 在此深表谢意.

图5所示的是 RTS 相对幅度随沟道变化的数值模拟结果. 这里假设沟道长度  $L = 200\text{nm}$ , 氧化层陷阱到沟道的距离  $d = 2\text{nm}$ . 可以看出, 当沟道较宽时, 两种机制引起的 RTS 幅度都比较小; 随着沟道宽度的减小, 两种机制引起的 RTS 幅度均增大, 当沟道宽度小于40nm 时, 迁移率涨落模型中 RTS 增大幅度远较载流子数涨落中为大. 这一结果充分表明, 在极细沟道 MOSFET 器件的电导涨落中, 氧化层荷电陷阱对沟道载流子的库仑散射引起的迁移率涨落占主导地位. 可以预计, 随着器件沟道的进一步减小, RTS 噪声幅度将进一步增加, 并将严重影响器件的正常工作状态.

## 4 结论

本文研究了极细沟道 NMOSFET 中 RTS 噪声的特性. 观测到了弱反型区 RTS 信号的幅度(>

## 参 考 文 献

- [1] M. J. Uren, D. J. Day and M. J. Kirton, Appl. Phys. Lett., 1985, **47**: 1195—1198.
- [2] M. J. Kirton and M. J. Uren, Adv. Phys., 1989, **38**: 367—469.
- [3] A. Ohata, A. Toriumi, M. Iwase and K. Dutoit, J. Appl. Phys., 1990, **68**: 200—205.
- [4] Z. Shi, J. P. Mieville and M. Dutoit, IEEE Trans. Electron Devices, 1994, **41**: 1161—1169.
- [5] H. Ishikuro, T. Saraya, T. Hiramoto and T. Ikoma, Jpn. J. Appl. Phys., 1996, **35**: 858—863.
- [6] N. Lukyanchikova, M. Petrichuk, N. Garbar, E. Simoen and C. Claeys, Appl. Phys. Lett., 1998, **73**: 2444—2447.
- [7] 张炯, 吴正立, 李瑞伟, 半导体学报, 1998, **19**(5): 369—374; ZHANG Jiong, WU Zhengli and LI Ruiwei, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(5): 369—374(in Chinese).
- [8] H. Ishikuro, T. Fujii, T. Saraya, G. hashiguchi and T. Ikoma, Appl. Phys. Lett., 1996, **68**: 3585—3588.
- [9] H. Nakamura, N. Yasuda, K. Taniguchi, C. Hamaguchi and A. Toriumi, Jpn. J. Appl. Phys., 1989, **28**: 2057—2061.