

高迁移率 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 沟道 MOSHEMT 与 MOSFET 器件特性的研究*

常虎东¹⁾ 孙兵¹⁾ 卢力¹⁾ 赵威¹⁾ 王盛凯¹⁾ 王文新²⁾ 刘洪刚^{1)†}

1) (中国科学院微电子研究所, 微波器件与集成电路研究室, 北京 100029)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2012年3月8日收到; 2012年5月11日收到修改稿)

从模拟和实验两个方面对高迁移率 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 沟道金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管 (MOSHEMT) 和金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 器件开展研究工作. 研究发现 InAlAs 势垒层对 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ MOSHEMT 的特性具有重要影响. 与 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ MOSFET 相比, $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ MOSHEMT 表现出优异的电学特性. 实验结果表明, $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ MOSHEMT 的有效沟道迁移率达到 $2812 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$, 是 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ MOSFET 的 3.2 倍. 0.02 mm 栅长的 MOSHEMT 器件较相同栅长的 MOSFET 器件具有更高的驱动电流、更大的跨导峰值、更大的开关比、更高的击穿电压和更小的亚阈值摆幅.

关键词: 金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管, 金属氧化物半导体场效应晶体管, InGaAs , Al_2O_3

PACS: 73.40.Qv, 73.61.Ey, 77.84.Bw

1 引言

在过去的四十多年中, 硅基互补金属氧化物半导体 (CMOS) 技术遵循摩尔定律通过缩小特征尺寸和栅氧化层厚度来提高性能, 取得了巨大的成功. 但是晶体管的特征尺寸减小到 22 nm 以后, 硅基 CMOS 技术进一步缩小尺寸来提高性能面临着物理和技术双重挑战. 学术界与产业界普遍认为: 选用高迁移率沟道材料和非平面器件结构是突破硅基 CMOS 技术瓶颈的一种有效途径. InGaAs 以其高电子迁移率特性成为“后 22 nm ” NMOS 技术沟道材料的研究热点之一. 近年来, 以 InGaAs 为沟道材料, 采用 ALD (原子层沉积) 技术沉积 Al_2O_3 , HfO_2 和 ZrO_2 等高 K 介质^[1-3], 离子注入工艺制备源漏, 制作的金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 取得了重要的研究进展. 但界面陷阱密度无法与 Si/SiO_2 相比拟, InGaAs

沟道有效迁移率远低于其本征迁移率. 为此, 一些新结构与新技术被相继报道: 抬高源漏技术制作的 InGaAs MOSFET^[4] 驱动电流大于 2 A/mm ; 采用源漏自对准工艺的 InP 基 InGaAs 沟道高电子迁移率晶体管 (HEMT)^[5] 的短沟道效应较 Si 基 MOSFET 有很大改善; 抬高源漏与埋沟技术相结合制作的 InGaAs 金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管 (MOSHEMT)^[6] 沟道有效迁移率超过 $5000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$.

然而在 MOSHEMT 器件研究中, 已报道的研究成果多侧重于 MOSHEMT 与 HEMT 器件的各种物理和电学特性的分析比较^[7-9]. 本文通过模拟计算和实验验证, 重点分析研究了 GaAs 基 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 材料 MOSHEMT 器件中 InAlAs 势垒层的作用. 结果表明: InAlAs 减弱了 Al_2O_3 介质中的陷阱电荷和界面缺陷电荷散射机制对 InGaAs 沟道电子迁移率的影响, MOSHEMT 器件有效沟道迁移率是 MOSFET 器件

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CBA00605, 2010CB327501)、国家科技重大专项 (批准号: 2011ZX02708-003) 资助的课题.

† E-mail: liuhonggang@ime.ac.cn

的 3.2 倍, MOSHMET 器件较 MOSFET 器件电学性能显著提高.

2 势垒层对 MOSHEMT 器件特性的影响

利用 Synopsys 公司的 Sentaurus 软件对如图 1 所示 MOSHEMT 和 MOSFET 器件进行模拟. 模拟计算栅压变化时 MOSHEMT 器件中的电子浓度分布和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InAlAs}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InGaAs}$ 界面陷阱浓度变化对 MOSHEMT 和 MOSFET 器件转移特性的影响, 探讨和分析了 InAlAs 势垒层在 MOSHEMT 器件中的作用.

从 MOSHEMT 器件能带对准图 (图 2) 中

可以看出, $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 的导带带阶为 0.47 eV. 随着栅电压增加, 费米能级超过 InGaAs 导带底时, 电子只在 InGaAs 沟道层中积累; 费米能级超过 InAlAs 势垒层时, InGaAs 沟道层和 InAlAs 势垒层中都出现了电子积累, MOSHMET 器件出现双导电沟道. 如图 3 所示, 在不同的栅电压下, InAlAs 势垒层和 InGaAs 导电沟道中的电子浓度不断变化. 在栅压为 0, 0.5 和 1 V 时, InAlAs 势垒层的积累电子浓度都未达到 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 此时 InAlAs 势垒层为非导电沟道, InGaAs 为导电沟道; 栅压为 2 V 时, InAlAs 势垒层的积累电子浓度大于 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 主要分布在靠近 Al_2O_3 一侧, 器件形成了双导电沟道. 由于 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 迁移率小于 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$, 器件形成双导电沟道时, 有效沟道迁移率会迅速下降.

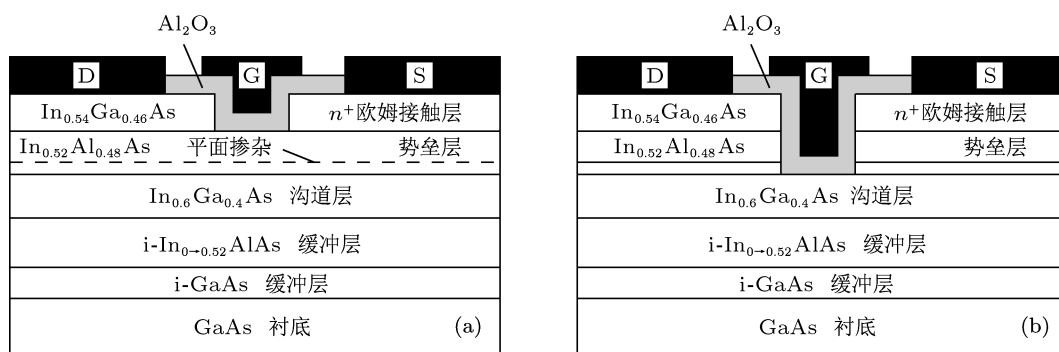


图 1 (a) MOSHEMT 的截面图; (b) 无 InAlAs 势垒层 MOSFET 的截面图

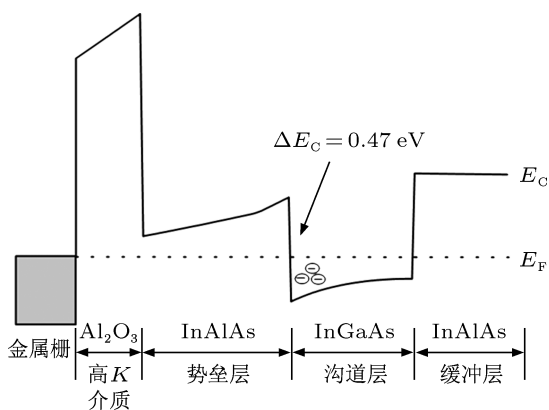


图 2 MOSHEMT 器件的能带对准示意图

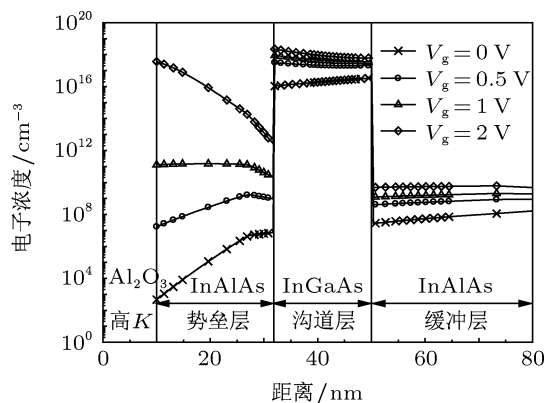


图 3 MOSHEMT 器件不同栅压下的电子浓度分布 (栅中间位置)

如图 4 所示, 不同 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InAlAs}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InGaAs}$ 界面陷阱密度对 MOSHEMT 器件与 MOS-

FET 器件转移特性的影响有明显差异. 从图中可以看出, 无 InAlAs 的 MOSFET 器件的跨导峰值随界

面陷阱密度增加而减小, 阈值电压随界面陷阱电荷增大而增大, MOSHEMT 器件跨导峰值和阈值电压

则无明显变化. 这是由于 InAlAs 势垒层可以屏蔽界面陷阱电荷对沟道载流子输运特性的影响.

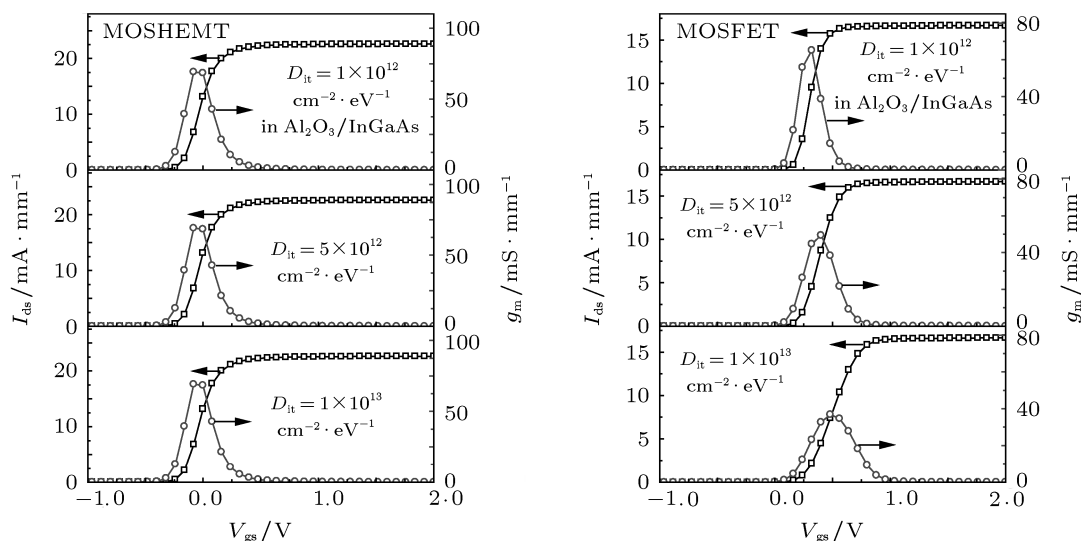


图4 导带附近界面陷阱密度对器件特性的影响

3 器件制备及其性能分析

如图 1(a) 和 (b) 所示, GaAs 基 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ MOSHEMT 器件和 MOSFET 器件采用相同的材料结构与器件结构. 在半绝缘 GaAs 衬底上采用分子束外延 (MBE) 方法, 依次生长 300 nm GaAs, 1000 nm In 组分渐变的 InAlAs 缓冲层, 18 nm 本征 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 沟道层, 22 nm $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ ($2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ Si 平面掺杂位于 InGaAs 沟道以上 4 nm), 20 nm 掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 N 型 InGaAs 帽层.

栅槽腐蚀采用柠檬酸双氧水系 ($\text{CA}:\text{H}_2\text{O}_2 = 1:1$) 腐蚀液, MOSFET 器件采用 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (1:1) 腐蚀液选择性腐蚀 InAlAs 势垒层, 采用 Beneq 公司原子层沉积系统 TFS200, 在 300°C 反应温度下, 沉积 10 nm Al_2O_3 高 K 介质薄膜. 采用电子束蒸发沉积高功函数金属 (Ni/Au), 经常规剥离工艺形成金属栅电极. 用稀释的 HF 酸选择性腐蚀源漏区的 Al_2O_3 高 K 介质, 电子束蒸发 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 制作源漏金属. 利用 HP4155 半导体参数测试仪和 HP4284 测试器件直流特性和电容-电压 (C-V) 特性.

如图 5 所示, MOSHEMT 器件与 MOSFET 器件都表现出良好的输出特性与转移特性. 与 MOSFET 器件特性相比, MOSHEMT 器件的最大饱和电流密度增加一倍, 跨导增加了 70%, 电流开关比增加一倍. 这主要得益于 MOSHEMT 器件大的沟道有效迁移率.

图 6 给出的 MOSHEMT 器件与 MOSFET 器件沟道的有效载流子迁移率, 是采用 split-CV 的方法, 依据栅长 0.02 mm 器件 C-V 特性提取出沟道有效电荷 (Q_n)^[10], 和器件线性区的电流-电压特性, 由公式 $\mu = \frac{L}{W} \cdot \frac{I_D}{V_{DS} Q_n}$ ^[11] 计算得到. MOSHEMT 有效沟道迁移率峰值为 $2812 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$, 是 MOSFET 有效沟道迁移率峰值 $881 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 3.2 倍. 这是由于在低电场条件下, 有效沟道迁移率主要由库仑散射决定^[12]. MOSHEMT 器件的载流子 (电子) 集中在 InGaAs 沟道中, 22 nm 厚度的 InAlAs 势垒层可减弱 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InAlAs}$ 界面陷阱电荷、介质固定电荷和陷阱电荷对沟道载流子的库仑散射. 但对于 MOSFET 器件, InGaAs 沟道直接受到 Al_2O_3 介质中的各种电荷和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InGaAs}$ 界面相关的库仑散射影响, 有效沟道迁移率很低. 随着有效电场的增加, MOSHEMT 和 MOSFET 的有效沟道迁移率

在到达峰值后迅速下降, 但 MOSHEMT 器件的迁移率仍大于 MOSFET 器件. 这是因为在这一电场范围, 表面散射是 MOSFET 器件 InGaAs 沟道有效迁移率下降的主要原因^[12]; 正栅偏压作用下 InAlAs 势垒层积累电子形成导电沟道是 MOSHEMT 器件沟道有效迁移率下降的主要原因^[6]. 但正栅压时, InAlAs 势垒层中的电子浓度依然小于 InGaAs 沟道层 (如图 3 所示), MOSHEMT 器件的沟道有效迁移率主要由 InGaAs 沟道决定. 因为 MOSHEMT 器件 InGaAs 沟道远离 Al₂O₃/InAlAs 界面, 不受表面散射机制影响, 所以在 2 MV/cm 电场下, MOSHEMT 器件的有效沟道迁移率仍大于 MOSFET 器件. 在

图 4 的器件仿真结果中, 同样表明了 InAlAs 可以减弱 Al₂O₃/InAlAs 界面陷阱电荷和介质中的缺陷电荷等散射机制对 InGaAs 沟道载流子迁移率的影响.

如图 7 所示, MOSHEMT 器件栅的击穿电压为 9.5 V, 高于 MOSFET 器件 8.8 V 的击穿电压. 这是由于 MOSHEMT 器件的导电沟道中电子需越过 InAlAs/InGaAs 导带带阶进入 InAlAs 势垒层积累, 所以相同栅压下, MOSHEMT 器件 InAlAs 一侧的电子浓度低于 MOSFET 器件 InGaAs 沟道, 器件栅介质两侧的电场强度小于 MOSFET.

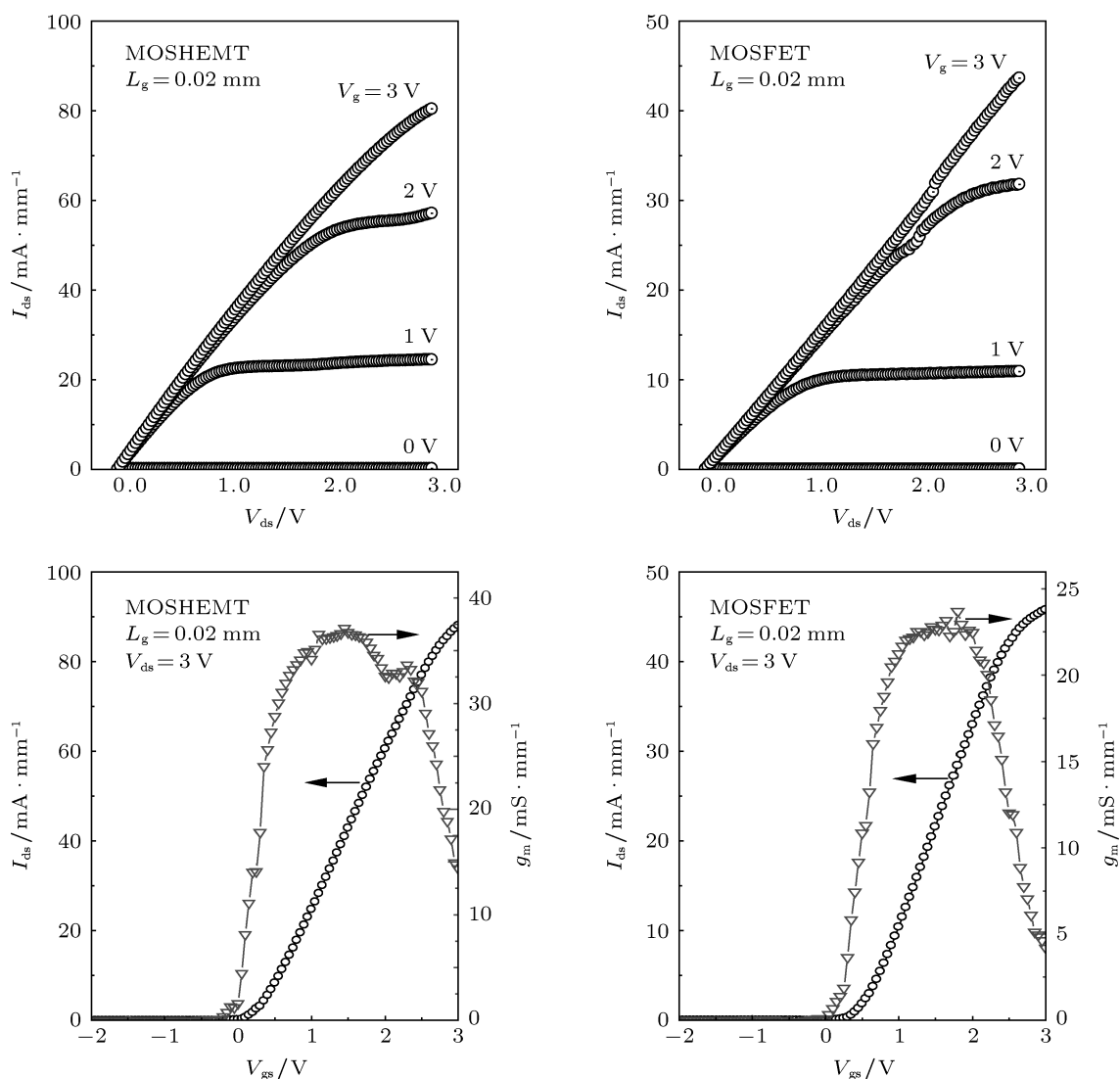


图 5 MOSHEMT 与 MOSFET 的输出特性曲线和转移特性曲线

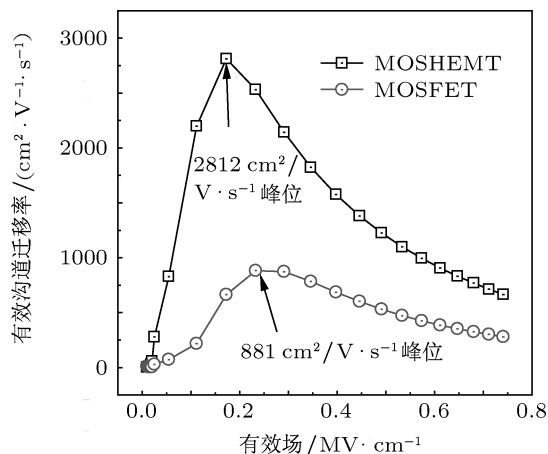


图6 MOSHEMT 与 MOSFET 的有效沟道迁移率曲线

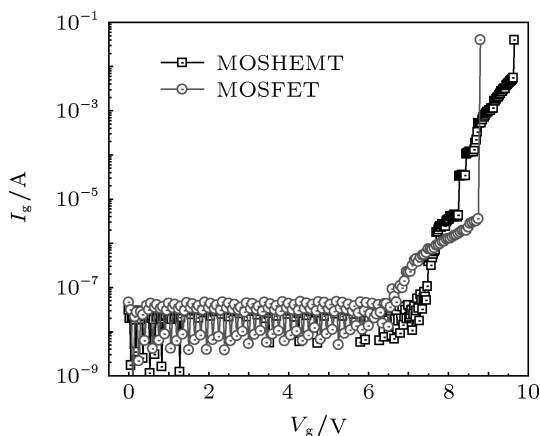


图7 MOSHEMT 与 MOSFET 的栅击穿特性曲线

InAlAs 势垒层减弱介质中的缺陷电荷和界面陷阱电荷对沟道载流子影响的作用在器件的亚阈值特性上也得到表现. 如图 8 所示, 在 $V_g = 0 \text{ V}$ 附近, 可以看到 MOSHEMT 器件的亚阈值摆幅要好于 MOSFET 器件, 实现更好的关断特性. 如图 3 仿真结果所示, 在 $V_g = 0 \text{ V}$ 时, MOSHEMT 与 MOSFET 器件的导电沟道都是 InGaAs 沟道, MOSHEMT 器件中, InAlAs 势垒层中

的电子浓度已接近 Al_2O_3 栅介质, 其作用相当于介质层. 决定 MOSHEMT 器件亚阈值特性的界面为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$ 综合界面层. 由于 InAlAs/InGaAs 界面性质优于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InGaAs}$ 界面, 器件的亚阈值摆幅与界面陷阱电容的正相关关系, MOSHEMT 器件的亚阈值特性好于 MOSFET 器件.

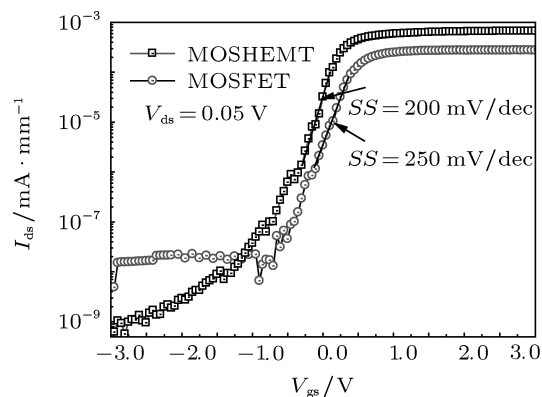


图8 MOSHEMT 与 MOSFET 的亚阈值特性

4 结论

通过模拟和实验对比, 研究了 InAlAs 势垒层在高迁移率 InGaAs MOSHEMT 器件中的作用. 研究发现 InAlAs 势垒层可以减弱 Al_2O_3 介质中的库伦散射机制和隔离 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InAlAs}$ 界面处的表面粗糙散射机制对器件沟道有效迁移率的影响. MOSHEMT 器件沟道迁移率峰值达到 $2812 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$, 是无 InAlAs 势垒层 MOSFET 的 3.2 倍. 栅长 0.02 mm 的 MOSHEMT 器件较同栅长 MOSFET 器件表现出更高的驱动电流、跨导峰值、电流开关比、栅击穿电压, 以及更低的亚阈值摆幅.

感谢中国科学院微电子研究所微波器件与集成电路研究室工艺线全体工作人员在流片过程中给予的支持和帮助.

[1] Wu Y Q, Wang W K, Koybasi O, Zakharov D N, Stach E A, Nakahara S, Hwang J C M, Ye P D 2009 *IEEE Electron Dev. Lett.* **30** 700
 [2] Goel N, Majhi P, Chui C O, Tsai W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 163517
 [3] Morassi L, Padovani A, Verzellesi G, Veksler D, Ok I, Bersuker G

2011 *IEEE Trans. Electron Dev.* **58** 107
 [4] Yonai Y, Kanazawa T, Ikeda S, Miyamoto Y 2011 *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet.* Washington, US, Dec 3-7, 2011 p307
 [5] Waldron N, Kim D H, Alamo J A D 2010 *IEEE Trans. Electron Dev.* **57** 297
 [6] Xue F, Jiang A, Zhao H, Chen Y T, Wang Y Z, Zhou F, Lee J 2012

- IEEE Electron Dev. Lett.* **33** 32
- [7] Feng Q, Hao Y, Yue Y Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1886 (in Chinese) [冯倩, 郝跃, 岳远征 2008 物理学报 **57** 1886]
- [8] Lin H, Yang T, Sharifi H, Kim S, Xuan Y, Shen T, Mohammadi S, Ye P D 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 212101
- [9] Zhou X, Tang C W, Li Q, Lau K M 2011 *Proc. 23th Intern. Conf. on IPRM* Berlin, Germany, May 22–26, 2011 p1
- [10] Koomen J 1973 *Solid-St. Electron.* **16** 801
- [11] Morassi L, Verzellesi G, Larcher L, Zhao H, Lee J C 2011 *Proc. 23th Intern. Conf. on IPRM* Berlin, Germany, May 22–26, 2011 p1
- [12] Takagi S I, Toriumi A, Iwase M, Tango H 1994 *IEEE Trans. Electron Dev.* **41** 2357

Study on high mobility In_{0.6}Ga_{0.4}As channel MOSHEMT and MOSFET*

Chang Hu-Dong¹⁾ Sun Bing¹⁾ Lu Li¹⁾ Zhao Wei¹⁾ Wang Sheng-Kai¹⁾
Wang Wen-Xin²⁾ Liu Hong-Gang^{1)†}

1) (Microwave Device and IC Department, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

2) (Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

(Received 8 March 2012; revised manuscript received 11 May 2012)

Abstract

High-mobility In_{0.6}Ga_{0.4}As channel metal oxide semiconductor high electron mobility transistor (MOSHEMT) and metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) are investigated based on simulation and experiment in this paper. It is found that InAlAs barrier layer has a great influence on the characteristics of In_{0.6}Ga_{0.4}As MOSHEMT. In_{0.6}Ga_{0.4}As MOSHEMT exhibits excellent electrical characteristics compared with In_{0.6}Ga_{0.4}As MOSFET. The experimental results show that the effective channel mobility of MOSHEMT is 2812 cm²/V·s⁻¹, which is 3.2 times that of MOSFET. A 0.02 mm gate length MOSHEMT shows higher drive current, peak transconductance, $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ratio and gate breakdown voltage and lower sub-threshold swing than the MOSFET with the same gate length.

Keywords: MOSHEMT, MOSFET, InGaAs, Al₂O₃

PACS: 73.40.Qv, 73.61.Ey, 77.84.Bw

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CBA00605, 2010CB327501) and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011ZX02708-003).

† E-mail: liuhonggang@ime.ac.cn