

Al₂O₃ 绝缘栅 AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件 温度特性研究*

刘林杰[†] 岳远征 张进城 马晓华 董作典 郝 跃

(西安电子科技大学, 宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071)

(2008 年 5 月 19 日收到, 2008 年 7 月 14 日收到修改稿)

采用原子层淀积(ALD)实现了 10 nm Al₂O₃ 为栅介质的高性能 AlGa_N/Ga_N 金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管(MOS-HEMT). 通过对 MOS-HEMT 器件和传统 MES-HEMT 器件室温特性的对比, 验证了新型 MOS-HEMT 器件饱和电流和泄漏电流的优势. 通过分析 MOS-HEMT 器件在 30—180°C 之间特性的变化规律, 与国内报道的传统 MES-HEMT 器件随温度退化程度对比, 得出了器件饱和电流和跨导的退化主要是由于输运特性退化造成的, 证明栅介质减小了引入 AlGa_N 界面的表面态是提高特性的重要原因.

关键词: 原子层淀积, AlGa_N/Ga_N, MOS-HEMT 器件, 温度特性

PACC: 7340Q, 7340N

1. 引 言

AlGa_N/Ga_N HEMT 器件由于具有禁带宽度大(3.4—6.2 eV), 电子饱和速度高(2.8×10^7 cm/s)和击穿场强大(≥ 5 MV/cm)等优点, 非常适用于高频、大功率与高温应用. 然而 AlGa_N/Ga_N 表面缺陷和有限的势垒高度所导致的栅泄露电流进一步限制了 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件的高频、大功率与高温可靠性. 为解决这一问题, 已有报道使用金属-绝缘层-半导体(MIS)^[1,2]或金属-氧化物-半导体(MOS)^[3]结构来抑制栅泄露电流. 本文使用的器件为蓝宝石衬底 AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件, 采用原子层淀积(atomic layer deposition, ALD)实现 Al₂O₃^[4,5]为栅介质的高性能 AlGa_N/Ga_N 金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管(MOS-HEMT).

AlGa_N/Ga_N 器件的优势在于高温环境的应用, 因此对于这种新型 AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件特性随温度的变化规律及其机理研究十分必要. 国际上对 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件的温度特性已有较多的报道^[6,7], 对于栅泄露电流随温度的变化规律和机理的解释各有不同. 本文对自行研制的 AlGa_N/Ga_N MOS-

HEMT 器件与传统的 MES-HEMT 器件进行了室温下直流特性的对比, 同时在提升温度过程中直流特性的下降以及栅泄露电流的变化规律进行了分析, 并用变温 $C-V$ 特性测量研究了器件随温度变化的机理. 发现了随温度变化传统的 MES-HEMT 器件的界面陷阱电荷对器件 $C-V$ 特性的影响; 同时介质在高温下的变化也会影响器件的特性.

2. 器件结构与实验

实验用的 AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件是通过低压 MOCVD 设备在(0001)面蓝宝石衬底上异质外延生长的 AlGa_N/Ga_N 异质结构材料研制而成. AlGa_N/Ga_N 异质结构材料层结构(从衬底向表面)如下: 40 nm AlN 成核层, 1 μm 未掺杂 Ga_N 外延层, 25 nm 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 AlGa_N 层. 新型 AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件栅长 0.8 μm , 栅宽 60 μm , 介质厚度 T_{ox} 为 10 nm. 图 1 为本文所用的两种同样尺寸的器件结构图. Hall 效应测量室温下该 AlGa_N/Ga_N 异质结构材料二维电子气(Two-Dimensional Electron Gas, 2DEG)迁移率和面密度分别为 $1150 \text{ cm}^2/\text{V s}$ 和 $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

* 国家自然科学基金(批准号: 60736033, 60676048)资助的课题.

[†] E-mail: lljixidian@163.com

AlGaIn/GaN MOS-HEMT 研制的基本工艺条件为:器件台面隔离采用 ICP(inductively coupled plasma)干法刻蚀,刻蚀深度为 150 nm;源漏欧姆接



图 1 (a) ALD $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ MOS-HEMT 器件结构示意图;
(b) AlGaIn/GaN MES-HEMT 器件结构示意图

触采用 Ti/Al/Ni/Au 830°C N_2 气中退火 60 s 形成;在栅金属制作之前,从同一片 AlGaIn/GaN 异质结构材料上分割部分放入原子层淀积腔体中,使用偏苯三甲酸酐(TMA)和去离子水分别作为 Al 源和 O 源, N_2 作为载气,在 300°C 下进行 AlGaIn/GaN MOS-HEMT 器件 Al_2O_3 栅介质原子层淀积.栅金属采用 Ni/Au.

利用 HP4156B 半导体参数测试仪测量器件的直流特性, $C-V$ 测试采用 Keithley 590 $C-V$ 分析仪进行.采用 West-bond-K1200D 热板对器件进行加温.实验测试了两种结构器件的室温直流特性,AlGaIn/GaN MOS HEMT 器件 $30\text{--}180^\circ\text{C}$ 的变温直流和 $C-V$ 曲线.

3. 结果与讨论

3.1. 室温电学特性对比分析

图 2 给出了 MES-HEMT 和 MOS-HEMT 器件泄

漏电流的对比.室温下 MOS 结构的泄漏电流比 MES 结构低大约两个数量级,这是由于 Al_2O_3 介质的引入分担了部分栅压,减少了 AlGaIn 层的压降,从而降低了泄漏电流,提高了击穿特性.另外从图中还能看出 MOS-HEMT 器件的栅压可以偏置到 +5 V,而传统的 MES-HEMT 器件由于其较大的泄漏电流,栅源偏置不能高于 +1 V.

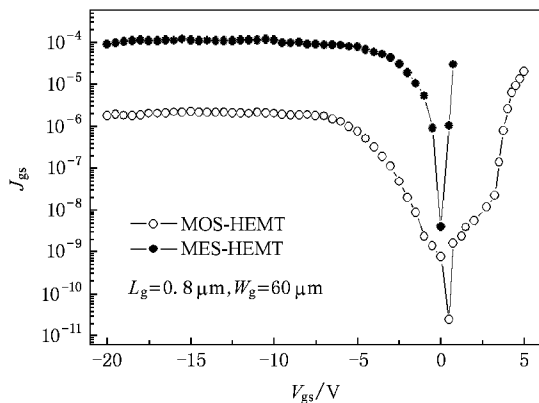


图 2 MES-HEMT 和 MOS-HEMT 器件栅泄漏电流对比

图 3 给出了直流扫描 MES-HEMT 和 MOS-HEMT 器件得到的输出特性曲线.扫描条件为 V_{gs} 分别从 -7 V 到 $+1\text{ V}$ 和 $+3\text{ V}$, V_{ds} 从 0 V 到 10 V 扫描.尽管在 $+1\text{ V}$ 时 MES-HEMT 器件的最大饱和电流为 $590\text{ mA}/\text{mm}$,高于 MOS-HEMT 器件的 $540\text{ mA}/\text{mm}$,但是由于比较大的栅泄漏电流, MES-HEMT 器件的 V_{gs} 不能进一步向正栅压方向偏置,最大饱和电流受到了限制.而 MOS-HEMT 器件在 $V_{gs} = +3\text{ V}$ 时的最大饱和电流达到 $600\text{ mA}/\text{mm}$,而且 V_{gs} 甚至可以达到 $+5\text{ V}$.这是由于栅介质的引入在降低 MOS-HEMT 器件泄漏电流的同时也提高了击穿电压,更正的栅压使得沟道 2DEG 密度也随之增加.如图 4 所示,室温下 MOS-HEMT 器件跨导虽然达到了 $100\text{ mS}/\text{mm}$,但是仍小于 MES-HEMT 的 $120\text{ mS}/\text{mm}$.

3.2. 电学特性随温度退化对比分析

图 5 给出了 MOS-HEMT 器件在 30°C 与 180°C 时直流输出曲线退化对比,图 6 给出其 30°C 与 180°C 时跨导退化情况对比.从图中可以看出 MOS-HEMT 器件最大饱和电流和跨导随温度的升高都有明显的退化,这是因为在 GaN 基器件中,导电沟道位于 AlGaIn/GaN 异质结界面处,主要的电导由 2DEG 提供.在器件电流达到饱和时,源漏饱和电流和跨导

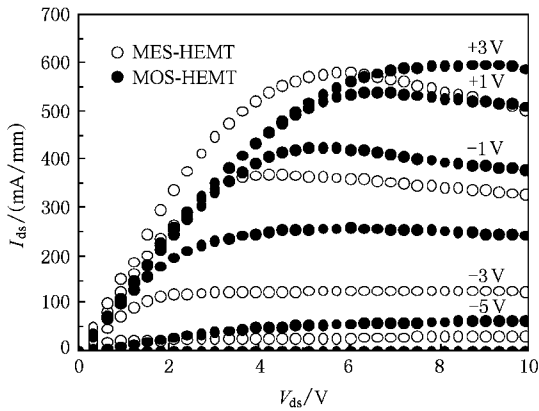


图3 MES-HEMT 和 MOS-HEMT 器件栅输出特性曲线对比

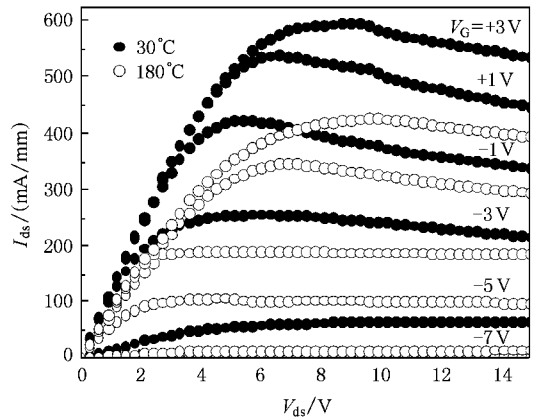


图5 MOS-HEMT 结构 DC 曲线 30°C 和 180°C 对比

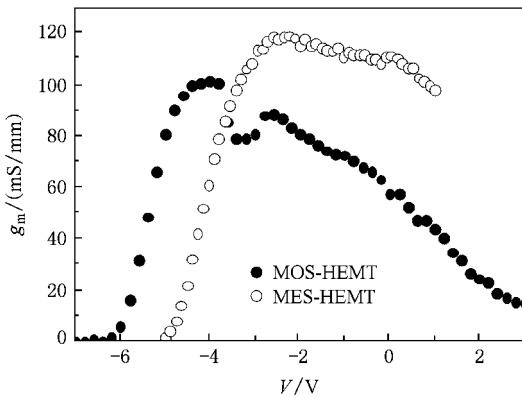


图4 MES-HEMT 和 MOS-HEMT 器件栅跨导曲线对比

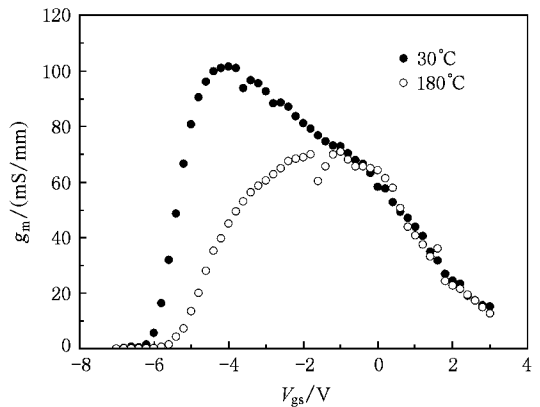


图6 MOS-HEMT 结构跨导曲线 30°C 和 180°C 对比

可以分别表示为^[8]

$$I_{Dsat} = \frac{qW_g \mu_n}{L} \int_{V_{TH}}^{V_g} n_{2D}(u) du, \quad (1)$$

$$G_m = \frac{q \mu_n}{L} n_{2D} V_{GS}. \quad (2)$$

由以上公式知在器件结构确定后饱和电流主要受迁移率 μ_n 和 2DEG 浓度 n_{2D} 的影响. 当温度由 30°C 变化到 180°C 时由于电子在输运过程中受到的散射作用增强, 迁移率随温度的升高会明显下降 ($\mu \propto T^{-3/2}$), 这是导致输出特性退化的主要原因^[9]. 由于 AlGaIn/GaN MOS-HEMT 器件的优势就在于可以承受比较高的栅压, 图 7 记录了在 30—180°C 器件栅压 +3 V 时的饱和电流, 源漏偏置 6 V 时的最大跨导, 其中最大饱和电流下降 30%, 最大跨导下降了 30%, 比国内报道的 HEMT 器件的退化量 39% 和 40% 有所减少^[10]. 在对跨导的测试中出现的双峰值现象, 是由于准费米能级与表面陷阱能级出现交叠的结果^[11].

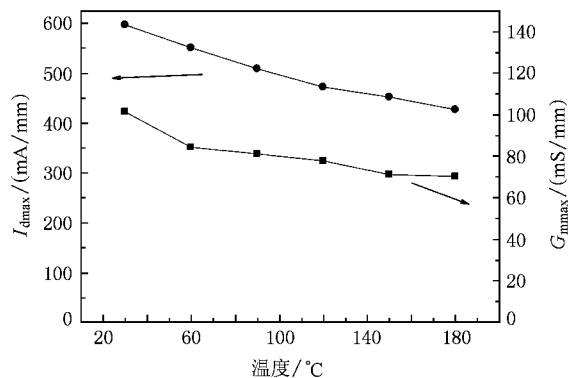


图7 MOS-HEMT 结构最大饱和电流 I_{dmax} 和最大跨导 G_{mmax} 的退化曲线

图 8 给出 MOS-HEMT 结构泄露电流随温度变化的关系, 器件的泄露电流是在源漏偏置为 40 V, 栅偏置为 -6 V 下测量得到的. 180°C 时的泄露电流比 30°C 时的有明显下降, 但是对比每个温度点处的

泄露电流变化发现泄露电流先下降后上升的特性, 拐点温度在 150°C ^[10,12]. 原因是不同肖特基漏电机理随温度的变化主导规律不同而使漏电发生变化, 比如在较低的温度下碰撞电离机理使栅漏电有负的温度系数^[13], 因为温度的升高导致电子在经过散射后能量降低, 从而减小了电子穿过栅介质形成泄漏电流的概率, 而在较高的温度下隧穿机理则使泄漏电流有正的温度系数^[14].

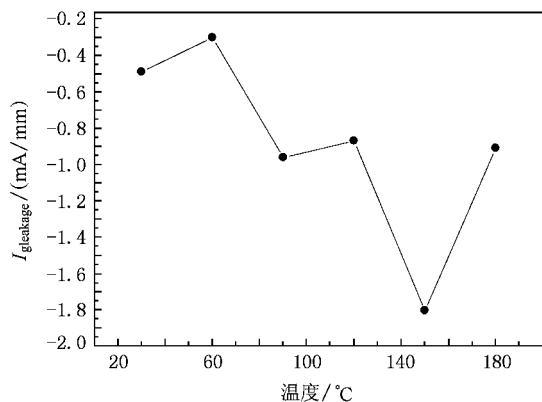


图8 MOS-HEMT 结构栅泄露电流随温度的变化曲线

3.3. C-V 曲线对比分析

图 9(a),(b) 分别显示了肖特基 C-V 测量得到的随温度变化 MES-HEMT 和 MOS-HEMT 器件变温 C-V 关系曲线. 随着温度的上升, 在偏压大于 0 的区域, MOS-HEMT 电容曲线有明显上升, 这和 MES-HEMT 器件相同. 但是在曲线从反型向耗尽过度的区域, 只有阈值电压的横向漂移, 基本观察不到曲线斜率的明显变化. 不同于传统 MES-HEMT 器件的特性中, 由于 2DEG 向 GaN 一侧的分布尾展宽而导致的 C-V 曲线随温度的升高而斜率变小的现象^[10]. 对比两种器件 C-V 特性, MOS-HEMT 器件电容的增大是由于 10 nm 栅介质的引入. 退化曲线中 MOS-HEMT 器件的 C-V 曲线随温度变化的漂移程度与传统 HEMT 器件不同, 如图 9(a) 所示, 随着温度的升高, MES-HEMT 器件 C-V 过渡曲线随温度的变化漂移很小. 这种现象是由于 MES-HEMT 器件的 AlGaIn 与栅金属界面存在表面态, 在测试台上持续的高温后, 相当于在空气中退火, 陷阱电荷释放了原本俘获的电子, 增加了电容一端的电荷变化量, 使得在过渡曲线中的电容变大. 这说明了 MES-HEMT 器件存在大量界面陷阱, 在温度变化中表现出不稳定性, 从而说明了 MOS 结构中栅介质的加入能大量减少界面陷阱电荷.

4. 结 论

本文对采用原子层淀积技术在蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN 异质材料结构上研制出的高性能 Al_2O_3 AlGaIn/GaN MOS-HEMT 器件与传统的 MES-HEMT 器件在室温特性上进行了对比, 并在 $30\text{--}180^\circ\text{C}$ 变温条件下对直流特性的下降以及栅泄露电流的变化规律进行了分析. 新型 MOS-HEMT 器件比传统的 MES-HEMT 器件相比存在明显优势: 虽然在最大饱和电流和最大跨导上存在不足, 但是栅介质的引入使 MOS-HEMT 器件可以承受较高的栅压, 泄露电流降低两个数量级; MOS-HEMT 器件随温度升高的退化程度相对传统 MES-HMET 较小, 饱和电流和跨导都随温度的升高而下降, 最大饱和电流下降 30%, 最大跨导下降了 30%. C-V 测试的温度特性说明介质层的引入克服了传统 MES-HEMT 器件温度特性中随温度上升, 电子分布陡峭程度下降的现象; 同时, 也可以减少表面陷阱电荷.

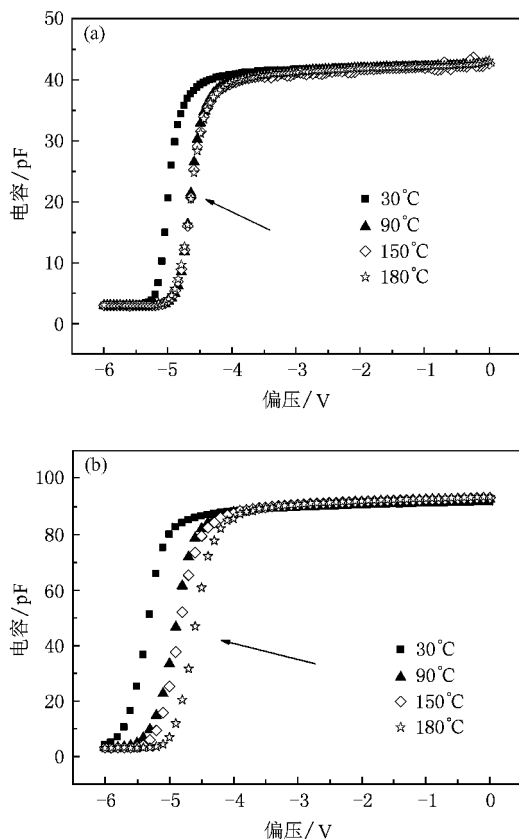


图9 (a) HEMT 器件的变温 C-V 曲线; (b) MOS-HEMT 器件的变温 C-V 曲线

- [1] Khan M A , Shur M S , Chen Q C 1994 *Electron Lett.* **30** 2175
- [2] Binari S C , Rowland L B , Kelner G 1995 *International Symposium Compound Semiconductors* 459
- [3] Ren F , Hong M , Chu S N G 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3893
- [4] Hashizume T , Ootomo S , Hasegawa H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2952
- [5] Yue Y Z , Hao Y , Feng Q , Zhang J C , Ma X H , Ni J Y 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 2419
- [6] Lu C Z , Xie X S , Zhu X D 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 113729
- [7] Ahmed M M , Ahmed H , Ladbrooke P H 1995 *J. Vac. Sci. Technol. B* **13** 1519
- [8] Stengel F , Mohammad S N , Morkoc H 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 3031
- [9] Saxler A , Debray P , Perrin R 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 369
- [10] Wang C , Zhang J F , Yang Y , Hao Y , Feng Q , Zhang J C 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 864 (in Chinese) [王 冲、张金凤、杨 燕、郝 跃、冯 倩、张进城 2006 半导体学报 **27** 864]
- [11] Asif K M , Michael S S , John N K , Chen Q , Jin B , William S 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 1083
- [12] Arulkumaran S , Egawa T , Ishikawa H , Jimbo T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3110
- [13] Tan W S , Houston P A , Parbrook P J , Wood D A , Hill G , Whitehouse C R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3207
- [14] Dyakonova N , Dickens A , Shur M S , Gaska R , Yang J W 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 2562

Temperature characteristics of AlGaIn/GaN MOS-HEMT with Al₂O₃ gate dielectric *

Liu Lin-Jie[†] Yue Yuan-Zheng Zhang Jin-Cheng Ma Xiao-Hua Dong Zuo-Dian Hao Yue

(Key Lab of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices , Xidian University , Xi 'an 710071 , China)

(Received 19 May 2008 ; revised manuscript received 14 July 2008)

Abstract

A metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistor (MOS-HEMT) with atomic layer deposition (ALD) of 10 nm Al₂O₃ gate dielectric is manufactured. The superiorities in saturation current and leakage current of the novel MOS-HEMT device are verified by comparison of the MOS-HEMT with traditional MES-HEMT devices at room temperature. The statistical analysis of the features of temperature variation of the device characteristics in the 30—180°C range , which shows the distinction in degradation degree by temperature on the two kinds of devices , is also illustrated. The conclusion that the device saturation current and the transconductance degradations are mainly caused by transport characteristic degradation is reached at. Thus , the conclusion can be drawn that all statistical and analytical results witness the significant role played by the reduced surface states in the surface of the AlGaIn in optimizing the characteristics of the device.

Keywords : ALD , AlGaIn/GaN , MOS-HEMT , temperature characteristics

PACC : 7340Q , 7340N

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60736033 , 60676048).

[†] E-mail : lljixidian@163.com