

高性能 X 波段增强型凹栅 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMT

张 蓉^{1,2,3}, 马晓华¹, 罗卫军^{2,3}, 刘 辉^{2,3}, 孙朋朋^{2,3}, 耿 苗^{1,2,3}

(1 西安电子科技大学 先进材料与纳米科技学院, 陕西 西安 710071;

2 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 3 中国科学院大学, 北京 100029)

摘 要: 在蓝宝石衬底上制备了栅长 L_g 为 $0.25\ \mu\text{m}$ 的增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMTs, 采用刻蚀凹栅与 ALD(原子层淀积) Al_2O_3 介质层的方法研制器件. 研制的增强型 MIS-HEMT 器件的阈值电压为 $+2.2\ \text{V}$, 饱和电流为 $512.3\ \text{mA}/\text{mm}$. 通过变频变温 C-V 方法测试提取的 Al_2O_3 介质层与 AlGaIn 势垒层之间的界面态密度相应于能级范围 $(E_c - 0.35)\text{eV} \sim (E_c - 0.65)\text{eV}$ 从 $8.50 \times 10^{12}\ \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 减小到 $9.73 \times 10^{11}\ \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$. 另外, 研制器件展示了突出的射频性能, 其截止频率(f_T)为 $30.5\ \text{GHz}$, 最高振荡频率(f_{max})为 $71.5\ \text{GHz}$. 连续波测试模式时, 该器件在 $8\ \text{GHz}$ 频率下, 饱和输出功率密度为 $1.7\ \text{W}/\text{mm}$, 相应附加功率效率为 32.6% . 展现出凹栅增强型 MIS-HEMT 在 X 波段射频电路中的应用潜力.

关键词: 增强型; GaIn MIS-HEMTs; 电容-电压(C-V); 功率

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)11-0094-05

High Performance Enhancement-Mode Gate-Recessed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMTs for X-band Applications

ZHANG Rong^{1,2,3}, MA Xiao-hua¹, LUO Wei-jun^{2,3}, LIU Hui^{2,3},
SUN Peng-peng^{2,3}, GENG Miao^{1,2,3}

(1 School of Advanced Materials and Nanotechnology, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In this letter, enhancement-mode (E-mode) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ metal-insulator- semiconductor high electron mobility transistors (MIS-HEMTs) with a gate-length (L_g) of $0.25\ \mu\text{m}$ are fabricated using gate recess and ALD- Al_2O_3 process on a sapphire substrate. The fabricated E-mode MIS-HEMTs exhibit a threshold voltage of $+2.2\ \text{V}$ and a saturation drain current of $512.3\ \text{mA}/\text{mm}$ at $V_{\text{GS}}=8\ \text{V}$. The interface trap state density (D_{it}) extracted by frequency/temperature-dependent capacitance-voltage (C-V) measurement between Al_2O_3 and AlGaIn decreases from $8.50 \times 10^{12}\ \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ at the energy of $(E_c - 0.35)\ \text{eV}$ to $9.73 \times 10^{11}\ \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ at $(E_c - 0.65)\ \text{eV}$. In addition, the fabricated devices show excellent RF performance which consists of a cut-off frequency (f_T) of $30.5\ \text{GHz}$ and a maximum oscillation frequency (f_{max}) of $71.5\ \text{GHz}$. Large-signal power measurements at $8\ \text{GHz}$ reveal a maximum saturated output power density of $1.7\ \text{W}/\text{mm}$ with a corresponding PAE of 32.6% in continuous-wave mode. These results showed the gate-recessed E-mode MIS-HEMTs are candidates for X-band applications.

Key words: enhancement-mode; GaIn MIS-HEMTs; capacitance-voltage (C-V); power

1 引言

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 基于其优异的材料性能被广泛应用于高压大功率射频领域^[1]. 近年来,常规耗尽型 HEMT 器件的性能不断突破^[2],同时,增强型器件因可以实现增强型/耗尽型逻辑电路来简化电路设计且缩小电路尺寸^[3]从而引起广泛关注. 至今,已有多种方法实现增强型器件,其中,凹栅 MIS 结构由于栅下存在介质薄层可以有效减小栅极漏电流,而且提高了栅压摆幅^[4],因此更适用于高压大功率电路中. 最近,多个研究团队通过缩小器件尺寸从而减小寄生电阻及电容^[5],报道了 GaN 基增强型 MIS-HEMT 出色的小信号性能. 然而,鲜有 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ MIS-HEMTs 的大信号性能的报道.

本文展示了 X 波段 (8 GHz) 下,栅长为 0.25 μm 的增强型凹栅 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ MIS-HEMTs 的大信号性能:饱和输出功率密度为 1.7 W/mm,附加功率效率为 32.6%. 制备器件的栅极漏电流当栅压超过 +9 V 时仍为 10^{-9} 量级,且该器件的阈值电压 (V_{th}) 为 2.2 V,截止频率 f_{t} 为 30.5 GHz,最高振荡频率 f_{max} 为 71.5 GHz,展示了其在高压大功率射频电路中的应用潜力.

2 器件结构与工艺

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ MIS-HEMTs 器件结构的横截面如图 1 所示. 器件制备采用的 AlGaIn/GaN 异质结生长在蓝宝石衬底上,包含 AlN 成核层、非掺杂 GaN 缓冲层、1 nm AlN 隔离层、23 nm $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 势垒层以及 1 nm GaN 帽层.

器件工艺中首先采用电子束蒸发 $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$ 形成源、漏欧姆接触,并在 850℃ 下 N_2 气氛中快速热退火 30 s. 采用 PECVD (等离子体增强化学气相沉积) 淀积 60 nm 的 Si_3N_4 , 目的是在器件表面形成钝化层避免在后续工序中被污染,然后采用离子注入实现平面隔离. 栅凹槽刻蚀通过两步等离子刻蚀实现. 首先,用 SF_6 电感耦合等离子体 (ICP) 设备刻蚀 SiN 得到栅脚区域 ($L_{\text{g}}=0.25\ \mu\text{m}$); 然后采用 Cl 基 ICP 刻蚀 AlGaIn 势垒层,采用原子力显微镜 (AFM) 测量 AlGaIn 势垒层刻蚀深度,AFM 图像如图 2 所示,其深度包含 ~60 nm Si_3N_4 与 ~22 nm AlGaIn 势垒层. ALD 沉积 Al_2O_3 之前,采用盐酸:水 = 1 : 10 溶液进行漂酸处理,清洁栅槽氧化物及刻蚀残留物. 后续采用 TMA (三甲基铝) 和 H_2O 作

为前驱体源进行 ALD 淀积 Al_2O_3 介质层,采用椭圆偏振仪测量陪片介质厚度为 17 nm. 然后对样片进行 400℃、2 min 退火. 电子束蒸发 Ni/Au 金属形成栅极金属. 器件栅宽为 100 μm ,源漏间距为 4 μm . 同时采用相同工艺制备了用于变频变温 C-V 测试的 MIS-diode 结构,中心圆形电极的直径为 130 μm ,环绕的欧姆接触金属电极与其间隔距离为 30 μm ,其尺寸较大,可以避免变频变温测试时,由于尺寸过小,外部环境对测试结果带来过大影响.

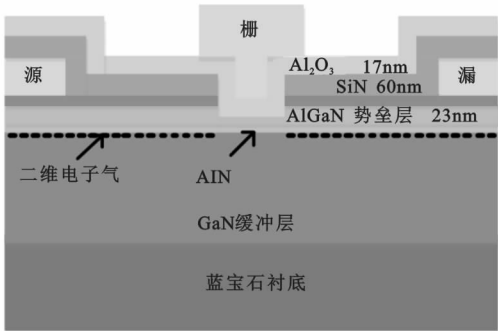


图 1 增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMT 结构示意图

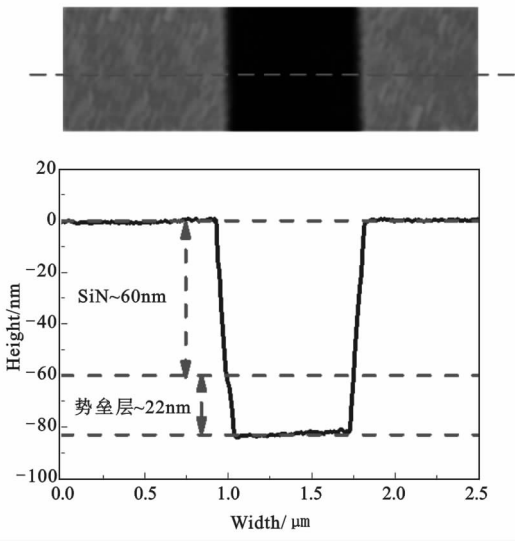


图 2 增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMT 栅槽区域 AFM 图像

3 结果与讨论

图 3 给出了研制的增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMTs 器件的直流输出特性, V_{GS} 为 8 V 时,饱和电流为 512.3 mA/mm.

图 4 展示了漏极偏置电压 V_{DS} 为 6 V 时,增强型 MIS-HEMT 的转移特性,并与常规耗尽型 HEMT 器件的转移曲线进行对比. 增强型 MIS-HEMT 阈值电压为 +2.2 V,相比于耗尽型 HEMT

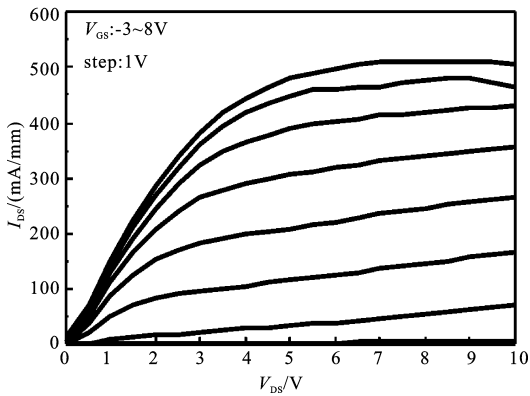


图3 增强型 Al₂O₃/AlGaIn/

GaN MIS-HEMTs 的输出特性曲线

的阈值电压-3.38 V 大幅度正漂. 因为栅下存在 Al₂O₃ 介质, 所以栅控能力稍有减弱, 峰值跨导略有降低. 图 5 展示了增强型 MIS-HEMT 与耗尽型 HEMT 的栅极电流特性, 增强型 MIS-HEMT 的栅极漏电流明显小于常规耗尽型 HEMT 的. 当栅压 V_{GS} 为 9 V 时, 增强型 MIS-HEMT 栅极漏电流仍保持在 10⁻⁹ 量级, 说明器件可以实现电路中良好的应用, 简化电路设计的同时, 提高栅压摆幅, 增强系统安全性.

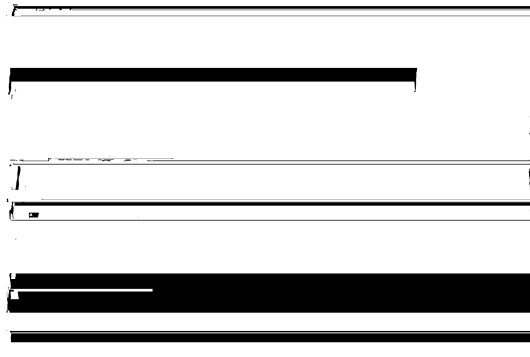


图4 增强型 MIS-HEMT 与耗尽型 HEMT 器件的转移特性曲线对比

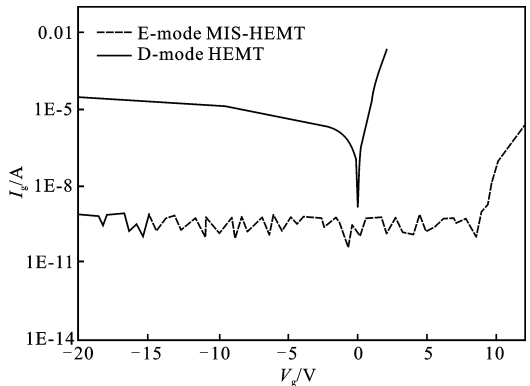


图5 增强型 MIS-HEMT 与耗尽型 HEMT 器件的栅极电流特性曲线对比

采用 B1500 半导体参数分析仪对凹栅 Al₂O₃/AlGaIn/GaN MIS-diode 进行变频变温 C-V 测试, 从而表征 Al₂O₃ 介质层与 AlGaIn 势垒层之间的界面态密度. 测试过程中频率范围为 1~100 kHz, 温度范围为 0~150℃. 图 6 为 C-V 测试曲线. 从图中可以看出 C-V 曲线只有一个上升台阶, 而理论上 MIS 结构应有两个台阶, 负向偏压条件下的台阶对应栅下二维电子气沟道的形成, 正向偏压条件下的台阶对应 Al₂O₃ 介质层与 AlGaIn 势垒层之间形成多子(电子)的积累^[6]. 本文研制器件时, 栅槽经过刻蚀, 且刻蚀深度接近 22 nm, 所以剩下的 Al-GaN 势垒层非常薄, 因此当栅压为正时, 栅下才能形成二维电子气的积累, 而此时, 正栅压进一步增大, 所以费米能级不断抬高, 二维电子气形成的同时, 沟道处的势垒对栅下二维电子气的限域性变差, 部分电子越过势垒到达 Al₂O₃/AlGaIn 的界面, 因此此时电容增大, 对应图中 CV 曲线中仅有的一个台阶.

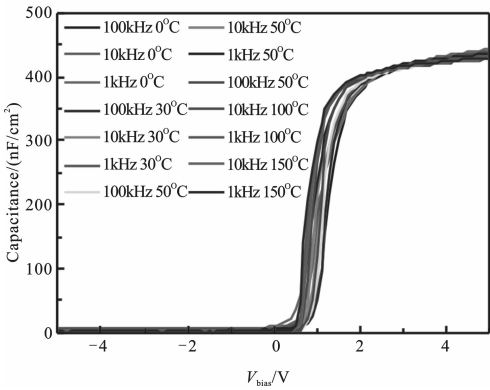


图6 凹栅 Al₂O₃/AlGaIn/

GaN MIS-diode 的变频变温 C-V 测试曲线

更深能级的界面态响应更低的测试频率与更高的温度, 所以不同测试频率与温度下 C-V 曲线出现偏离^[6-7]. 本文中, 通过分析 C-V 曲线中点处的电压偏移量计算界面态密度. 其中, 相应界面态能级的范围为

$$E_C - E_T = kT \ln \tau v_{th} \sigma_n N_C = kT \ln \frac{v_{th} \sigma_n N_C}{2\pi f} \quad (1)$$

式中, f 为测试信号频率; τ 为缺陷捕获时间常数; $v_{th} = 2 \times 10^7$ cm/s 为电子热速度; $\sigma_n = 1 \times 10^{-14}$ cm² 为电子捕获界面^[8]; $N_C = 2.6 \times 10^{17}$ cm⁻³ 为 AlGaIn 导带底有效态密度; k 为波尔兹曼常数 1.38×10^{-23} J/K; T 为具体测试温度, $E_C - E_T$ 为对应陷阱能级深度.

具体界面态密度通过以下公式^[9] 进行计算

$$D_{it}(E_C - E_T = \Delta E_{T_AVG}) = \frac{C \cdot \Delta V}{q \cdot \Delta E_{dis}} \quad (2)$$

$$\Delta E_{T_AVG} = \frac{E_T(f_1, T_1) + E_T(f_2, T_2)}{2} \quad (3)$$

$$\Delta E_{dis} = E_T(f_1, T_1) - E_T(f_2, T_2), \quad (4)$$

式中, C 为 C-V 曲线中归一化处理后的平台电容; ΔV 是 C-V 曲线台阶上升一半处的电压偏移值; $E_T(f_1, T_1)$ 和 $E_T(f_2, T_2)$ 是具体测试条件 (f_1, T_1) 和 (f_2, T_2) 可以探测到的具体缺陷能级深度, ΔE_{T_AVG} 为能级深度. 通过公式计算, 得到缺陷密度随能级深度的分布图, 如图 7 所示. 相应于距导带底能级深度范围从 $(E_C - 0.35) \text{ eV}$ 到 $(E_C - 0.65) \text{ eV}$, 界面态密度 D_{it} 从 $8.50 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 减小到 $9.73 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. 相比于 Yang et al. [7,9] 已报道的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 接触界面界面态密度值, 本文中研制出的器件 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 接触界面质量较好及界面态密度较小, 有益于应用于射频电路中, 提高器件可靠性.

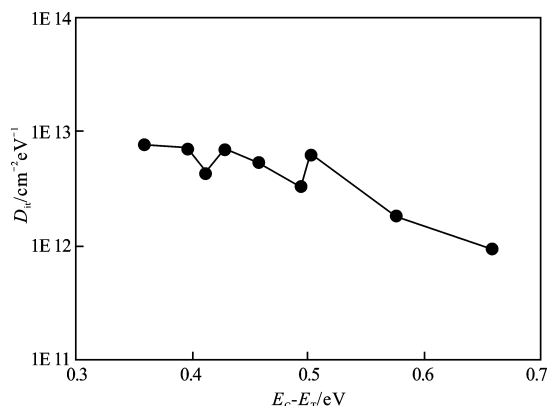


图 7 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面处界面态密度随能级的分布曲线

采用 Agilent HP8510C 矢量网络分析仪对所研制栅长 $0.25 \mu\text{m}$ 增强型 MIS-HEMT 器件进行小信号性能测试, 测试结果如图 8 所示. 当 V_{GS} 为 3 V 且 V_{DS} 为 10 V 时, 截止频率为 30.5 GHz , 最高振荡频率为 71.5 GHz , 该结果与近年 GaN 基增强型 MIS-HEMT 的性能相比是突出的[10]. 图 9 为 V_{DS} 为 10 V 时, 截止频率与最高振荡频率随栅压的变化曲线, 可以看出, V_{GS} 为 3 V 时, 截止频率与最高振荡频率达到最大值. 出色的射频性能与界面态密度是紧密相关的[11], 也再一次说明 Al_2O_3 介质层与 AlGaIn 势垒层接触界面质量良好.

本文中同时采用 load-pull 系统对研制器件进行 X 波段 (8 GHz) 下大信号性能测试. 测试结果如图 10 所示. 其源阻抗与负载阻抗分别是 $(57.97 + j105.97) \Omega$ 与 $(104.06 + j214.79) \Omega$, 得益于栅极漏电

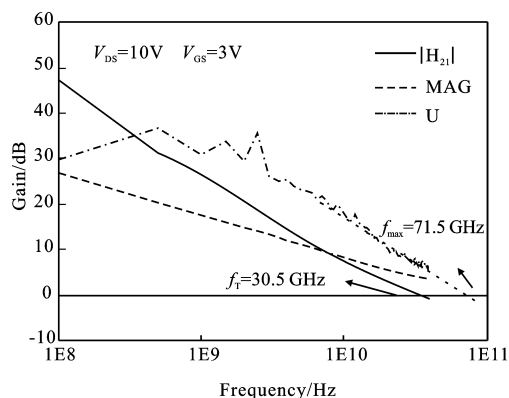


图 8 栅长 $0.25 \mu\text{m}$ 的增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMT 的小信号性能

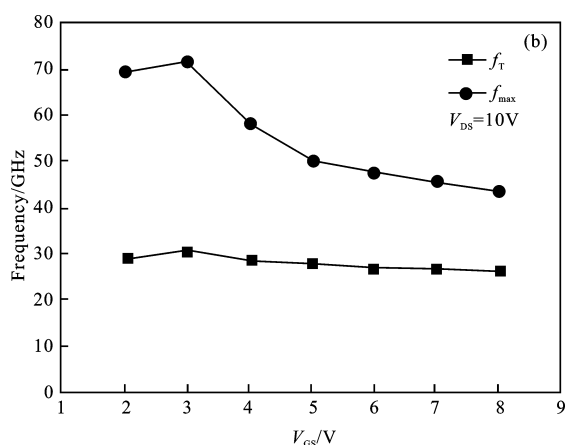


图 9 栅长 $0.25 \mu\text{m}$ 的增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMT 的截止频率与最高振荡频率随栅极电压的变化曲线

小及栅压摆幅大, 所研制器件的线性增益为 9.1 dB , 输出功率密度 P_{out} 为 1.7 W/mm , 相应的功率附加效率 PAE 为 32.6% . 至今, 鲜有关于以类似方法实现的 GaN 基增强型器件在 X 波段下的功率性能的报道, 本文报道的功率性能显示了 GaN 基凹栅增强型 MIS-HEMT 在高压大功率电路中的应用潜力, 后续基于此多做研究从而进一步提高器件的性能.

4 结束语

在蓝宝石衬底上研制了凹栅与 ALD Al_2O_3 的增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS-HEMTs. 所研制增强型器件的阈值电压为 $+2.2 \text{ V}$, 饱和电流为 512.3 mA/mm , 同时报道了同一器件在 X 波段的大信号性能, 包括输出功率密度 1.7 W/mm , 相应功率附加效率 32.6% . 器件截止频率接近 30.5 GHz , 最高振荡频率为 71.5 GHz . 研制器件的突出

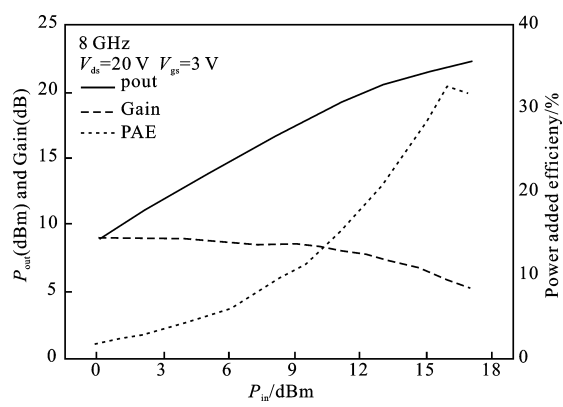


图 10 栅长 0.25 μm 的增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ MIS-HEMT 的在片 load-pull 测试曲线 (8GHz)

性能展现了 GaN 基增强型 MIS-HEMT 在高频高压电路中的应用潜力。

参考文献:

[1] Mishra U K, Shen L, Kazior T E. GaN-Based RF power devices and amplifiers[J]. Proceedings of the IEEE, 2008 , 96 (2) :287-305.

[2] Shinohara, K, Regan D, Corrion A et al. Deeply-scaled E/D-Mode GaN-HEMTs for sub-mm-Wave amplifiers and mixed-Signal applications [C] // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS) . IEEE,2012.

[3] Huang S, Liu X Y, Zhang J H, et al. High RF performance enhancement-mode $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ MIS-HEMTs fabricated with high-temperature gate-recess technique[J]. IEEE Electron Dev. Lett. 2015, 36(8): 754.

[4] Kuraguchi M, Takada Y, Suzuki T, et al. Normally-off GaN-MISFET with well-controlled threshold voltage[J]. Phys. Stat. Sol. (a), 2007, 204 (6): 2010-2013.

[5] Albrecht J D, Kane A , Chang T-H, DARPA's microscale power conversion program[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). IEEE,2012.

[6] Mizue C, Hori Y J, Marcin M, et al. Capacitance-voltage characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ structures and state density distribution at $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ -interface[J]. J. J. Appl. Phys , 2011 , 50 (2) : 021001-021001-7.

[7] Yang S, Liu S H, Liu C et al. Thermally induced threshold voltage instability of III-Nitride MIS-HEMTs and MOSC-HEMTs: Underlying mechanisms and optimization schemes[C]// IEEE Int. Electron Devices Meeting. IEEE,2014: 434.

[8] Yang S, Tang Z K, Wong K-Y et al. Mapping of interface traps in high-performance $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ MIS-Heterostructures using frequency- and temperature-dependent C-V techniques[C]// IEEE Int. Electron Devices Meeting, IEEE,2013: 152.

[9] Yang S, Liu S H, Lu Y Y et al. AC-Capacitance techniques for interface trap analysis in GaN-Based Buried-Channel MIS-HEMTs[J]. IEEE Trans. Electron Dev. 2015, 62(6): 1870.

[10] Maroldt S, Haupt C, Pletschen W et al. Gate-Recessed AlGaN/GaN based Enhancement-Mode high electron mobility transistors for high frequency operation[J]. J. J. Appl. Phys. , 2009, 48: 04C083-1.

[11] Feng Z H, Zhou R, Xie S Y et al. 18-GHz 3.65-W/mm enhancement-mode AlGaN/GaN HFET using fluorine plasma Ion implantation[J]. IEEE Electron Dev. Lett. , 2010, 31(12): 1386.

作者简介:

张 蓉 女,(1991-),硕士研究生. 研究方向为 GaN 增强型器件及其电路.

马晓华 男,(1973-),教授,博士生导师. 研究方向为宽禁带半导体材料、半导体器件及其可靠性、固态微波电路设计等.

罗卫军(通讯作者) 男,(1981-),博士,副研究员. 研究方向为 GaN 增强型器件电路及数字移相等.

E-mail:luoweijun@ime.ac.cn.

刘 辉 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为 GaN 基增强型器件及电路.

孙朋朋 男,(1990-),硕士研究生. 研究方向为 GaN 基数字移相器电路.

耿 苗 女,(1993-),硕士研究生. 研究方向为 GaN 开关器件及其电路.