

退火对 ALD Al₂O₃ 绝缘栅 AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件性能影响

李书兴¹, 孙楠¹, 刘艳红², 代建勋¹, 黄火林^{1*}

¹大连理工大学光电工程与仪器科学学院 辽宁大连

²大连理工大学物理学院 辽宁大连

【摘要】首先研究了不同退火温度对 ALD Al₂O₃ 绝缘栅介质的性能影响, 进一步验证了栅极后退火 (PGA) 对 Al₂O₃ AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件性能影响。实验结果表明, 在 400 °C 的 N₂ 氛围下 5 分钟快速退火处理可以有效改善介电材料的固定电荷和耐压性能。氧化铝的击穿场强由 7.0 MV/cm 提高到 8.0 MV/cm, 滞回 C-V 测量表明, Al₂O₃ 中的负固定电荷密度增加一个量级、可移动电荷显著降低。经过 400 °C 后栅退火 (PGA) 制作的 Al₂O₃-AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT 器件阈值电压 0.7 V, 亚阈值斜率 230 mV/dec, 栅极最大偏置电压 14 V, 饱和电流 600 mA/mm, 导通电阻为 5.88 Ω·mm, 10⁹ 的高导通/关态电流比、小于 10⁻⁶ mA/mm 的低关态漏电流。

【关键词】 Al₂O₃; 原子层沉积; MOSCAP; AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT

【基金项目】 国家自然科学基金项目 (61971090)

【收稿日期】 2023 年 2 月 14 日 **【出刊日期】** 2023 年 4 月 23 日 **【DOI】** 10.12208/j.jeea.20230007

Effect of annealing on Performance of ALD Al₂O₃ insulated gate AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT Devices

Shuxing Li¹, Nan Sun¹, Yanhong Liu², Jianxun Dai, Huolin Huang^{1*}

¹School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning

²School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning

【Abstract】 The effects of different annealing temperatures on the properties of Al₂O₃ gate dielectric were investigated, and the effects of post-gate annealing (PGA) on the properties of Al₂O₃ AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT devices were further verified. The results show that the fixed charge and voltage resistance of the dielectric material can be improved by annealing at 400°C N₂ for 5 min. The breakdown field strength of alumina increases from 7.0 MV/cm to 8.0 MV/cm. The hysteresis C-V measurements show that the negative fixed charge density increases by an order of magnitude and the movable charge decreases significantly. The Al₂O₃ AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT device fabricated by 400°C post -gate annealing (PGA) has a threshold voltage of 0.7 V, a sub-threshold slope of 230 MV/dec, a maximum gate bias voltage of 14 V, a saturation current of 600 mA/mm, and an on-resistance of 5.88 Ω·mm, 10⁹ high on/off ratio, low off-state leakage current less than 10⁻⁶ mA/mm.

【Keywords】 Al₂O₃; Atomic layer deposition; MOSCAP; AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT

1 引言

GaN 基高电子迁移率晶体管 (HEMT) 是下一代高频、大功率应用中最有前途的候选器件之一。该器件借助 AlGa_N/Ga_N 异质结极化效应形成的高电导率、高浓度的二维电子气实现强大的电流驱动, 同时还能保持 GaN 材料的耐高温高压、抗辐射等能力^[1-3]。凹栅槽金属-绝缘体-半导体 (MIS) 结构是

目前可以实现 AlGa_N/Ga_N HEMT 增强型器件的最优技术路线之一, 这种结构制作的器件可以获得更高的阈值电压 (V_{th}) 和更好的栅击穿耐久性^[4,5]。并且由于引入了栅极绝缘介质, 有效地降低了栅极漏电流, 提高了栅极的可偏置电压, 证实了 MIS 结构在凹型栅 AlGa_N/Ga_N MOS HEMT 器件中是必不可少的^[6-8]。Al₂O₃ 具有介电常数大、击穿场强高、

*通讯作者: 黄火林

在与 GaN 界面处导带偏移量大等优点, 是最合适的栅介质选择材料之一^[9,10]。在 Al₂O₃ 栅极绝缘介质的制备中, 原子层沉积 (ALD) 技术因其厚度可控性好、均匀性好而被广泛应用^[11]。然而, 这其中依然存在着一些技术难题, 尤其是在控制 Al₂O₃-GaN 基 MOS 器件的阈值电压方面, 由于在 Al₂O₃/AlGaIn 界面可能存在类施主缺陷或者 Al₂O₃ 薄膜中存在正移动电荷, 使得这些器件的阈值往往低于设计值^[12,13]。尽管有几个研究团队已经报道了沉积后退火 (PDA) 对 Al₂O₃/GaN MOS 二极管中固定电荷的影响^[14,15], 但是要为了实现 GaN 基 HEMT 增强型器件, 还需要了解后栅极退火 (PGA) 对凹型栅 Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS HEMT 器件的影响。在本工作中, 我们首先在 P 型硅上制作了 MOSCAP 器件, 在不同温度下快速热退火。通过对电容-电压 (C-V) 测量结果, 详细分析 Al₂O₃ 薄膜中的固定电荷和移动电荷随退火温度的变化。之后在 GaN 基 HEMT 器件上验证, 经过 400 °C 后栅极退火 (PGA) 制作的 Al₂O₃ AlGaIn/GaN MOS-HEMT 器件阈值电压 0.7 V, 亚阈值斜率 230 mV/dec, 栅极最大偏置电压 14 V, 饱和电流 600 mA/mm, 导通电阻为 5.88 Ω·mm, 10⁹ 的高导通/关态电流比和小于 10⁻⁶ mA/mm 的低关态漏电流。

2 器件结构及制造工艺

本文中首先涉及到的器件是硅基 MOSCAP 器件, 采用 P 型硅衬底, 掺杂浓度为 5×10¹⁵ cm⁻³, 在此之上采用 ALD 沉积 50 nm Al₂O₃ 介质, 采用电子束蒸发沉积 Ti/Al (30/100 nm) 金属叠层电极, 选择多个相同样品分别在 350 °C、400 °C、450 °C 下 N₂ 氛围快速热退火 5 分钟。凹型栅 Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS HEMT 器件则选用 6 英寸硅衬底上金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术生长了 AlGaIn/

GaN 异质结的外延片。如图 1 所示, 外延层由 20 nm 原位生长的 Si₃N₄ 钝化层, 25 nm Al_{0.27}Ga_{0.73}N 势垒层和 4.0 μm 未掺杂 GaN 缓冲层组成。用霍尔测量法在室温下测量了二维电子气密度和电子迁移率, 分别为 9.2×10¹² cm⁻² 和 1500 cm²/V·s。源-栅间距、栅-漏间距、栅长和栅宽分别为 3.5、17.0、1.0 和 140 μm。

采用电子束蒸发沉积 Ti/Al (30/300 nm) 金属叠层, 然后在 850 °C 的 N₂ 气氛下快速热退火 30 s, 形成欧姆接触。通过传输线法 (TLM) 测量, 发现接触电阻为 0.7 Ω·mm。等离子体反应离子刻蚀 (ICP-RIE) 系统, 用基于 Cl₂/BCl₃ 的等离子体刻蚀形成栅沟, 优化后的 ICP 和偏置功率分别保持在 30 和 150 W。通过电容-电压测试^[16]计算得到二维电子气浓度为 7.40×10¹¹ cm⁻², 迁移率为 147 cm²/V·s。ALD 沉积 20 nm Al₂O₃ 的栅介质, 最后用电子束蒸发沉积 100 nm 的金属镍作为栅极电极, 并将样品放在 400 °C 的 N₂ 氛围中退火 5 分钟。

3 结果与讨论

MOSCAP 器件击穿测试方法是在金属电极施加负电极, 在 P 型硅衬底施加正电极。施加应力时, 空穴积累在半导体表面, 半导体能带向上弯曲, 形成积累态。此时, 空穴聚集在硅表面很薄的区间内, 屏蔽了电压对半导体内部的影响, 施加的电压均降落在 Al₂O₃ 薄膜上。

图 2 显示了 50 nm Al₂O₃-MOSCAP 在未退火 (a)、350 °C (b)、400 °C (c) 和 450 °C (d) 退火条件下的击穿情况。如图 2 (a) 所示, 介质在被击穿前的漏电一直小于 10⁻⁷ A/mm, 击穿场强是 7.0 MV/cm。350 °C、400 °C 和 450 °C 退火均改善了介质的击穿情况, 达到 8.0 MV/cm。但 350 °C 退火样品漏电增大, 而 400 °C 退火样品击穿前的漏电则小于 10⁻⁸ A/mm。

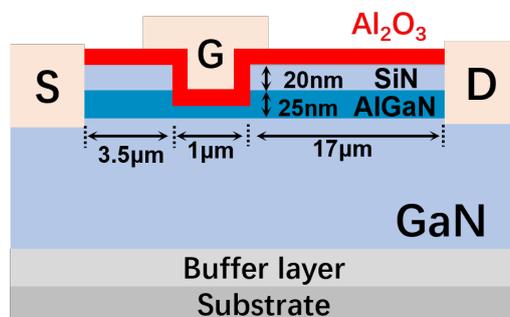


图 1 凹型栅 Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS HEMT 器件横截面示意图

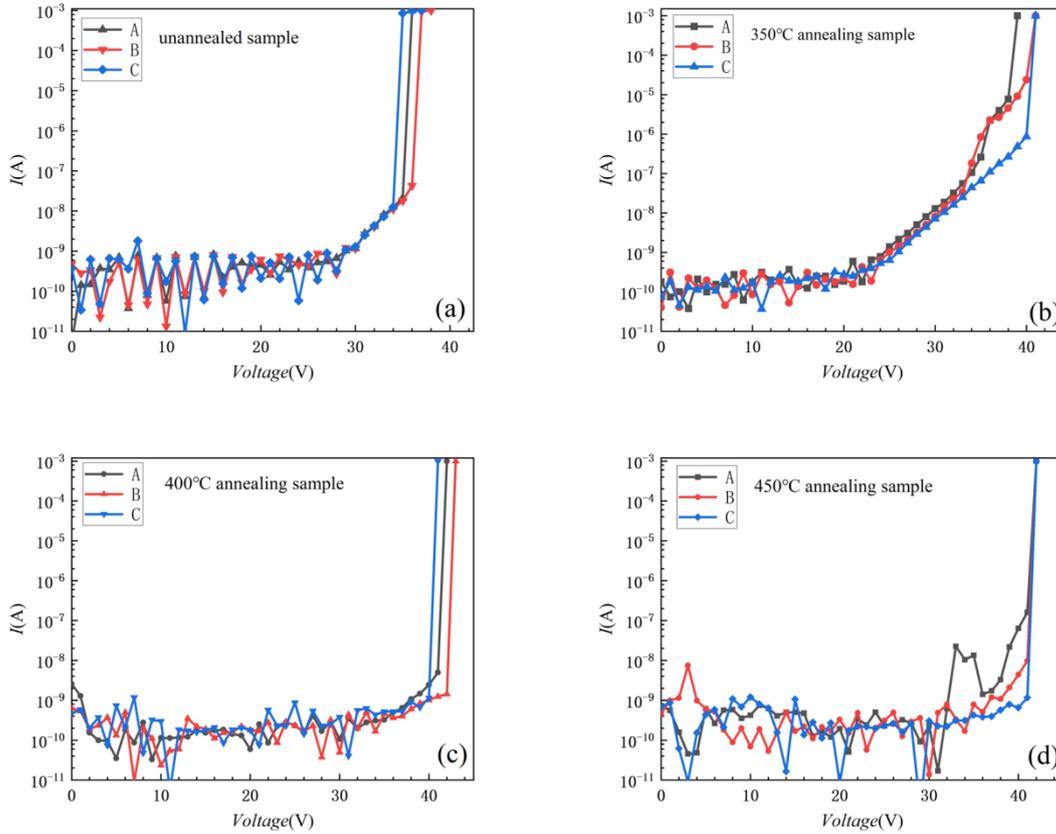


图 2 不同退火温度对 MOSCAP 器件击穿情况的影响

图 3 显示了 50 nm Al₂O₃-MOSCAP 在未退火 (a)、350 °C (b)、400 °C (c) 和 450 °C (d) 退火条件下的电容-电压曲线变化情况。器件的整体电容由介质电容 C_{ox} 和由能带弯曲形成的耗尽区电容 C_j 串联组成。

$$C = \frac{C_{ox}C_j}{C_{ox}+C_j} \quad (1)$$

氧化物介质的介电常数^[16]:

$$\varepsilon = \frac{C_{ox}t_{ox}}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

t_{ox} 是氧化物介质的厚度, ε_0 是真空介电常数 8.854×10^{-12} F/m。当未施加外界电压, 金属的费米能级大于半导体的费米能级, 半导体/介质界面能带弯曲, 形成耗尽区, 平带电容等于介质电容和耗尽区介质串联。耗尽区宽度和电容公式^[17]:

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_S \varepsilon_0 K_B T}{q^2 N_A}} \quad (3)$$

$$C_j = \frac{\varepsilon_S \varepsilon_0}{L_D} \quad (4)$$

从测试曲线可知平带电容对应的平带电压 V_{FB} 。考虑到薄膜中的固定电荷、金属与半导体的功函数差两种因素都会影响 C-V 曲线的平移。因此由公式 (5) 最终可得到薄膜中的固定电荷。

$$Q_{SS} = -\frac{(V_{FB}+V_{MS}) C_{ox}}{q} \quad (5)$$

从图 3 (a) 计算可得薄膜未退火前的介电常数是 8.6, 固定电荷是 -5.5×10^{11} cm⁻², 350 °C 退火样品 (b) 介电常数降低为 4.23, 400 °C 退火样品 (c) 介电常数维持在 8.0, 450 °C 退火样品 (d) 则出现最大电容离散情况, 即介电常数也开始有所降低。同时薄膜中的固定电荷得到了改善, 其中计算得到 400 °C 退火样品中负固定电荷密度最高, 数量为 -2.2×10^{11} cm⁻², 这有利于增强型器件的实现。最后从曲线的回滞情况看, 400 °C 曲线回滞最小, 这表明薄膜中的移动电荷在经过退火后显著降低, 综合来看, 400 °C 退火样品薄膜性质最佳。

图 4 (a) 显示了器件在 $V_{DS}=10$ V 条件下的对

数输出特性曲线。阈值电压 V_{th} 定义在 $I_{DS}=10 \mu\text{A}/\text{mm}$, 图中提取值为 0.7 V , 实现了增强型的器件导通。器件导通/关态电流比达 10^9 , 亚阈值摆幅 $230 \text{ mV}/\text{dec}$, 栅漏电流一直低于 $10^{-6} \text{ mA}/\text{mm}$ 。从图 4(b) 可得, 在 $V_{GT} = V_{GS} - V_{th} = 10 \text{ V}$ 时, 器件的最大漏电

流密度在 $600 \text{ mA}/\text{mm}$ 左右, 器件的导通电阻为 $5.88 \Omega \cdot \text{mm}$ 。

图 5 说明了器件增强型的栅极稳定性, 栅极的击穿电压高达 14 V , 栅极泄漏电流在栅极击穿前如图 5 所示保持在 $10^{-6} \text{ mA}/\text{mm}$ 左右。

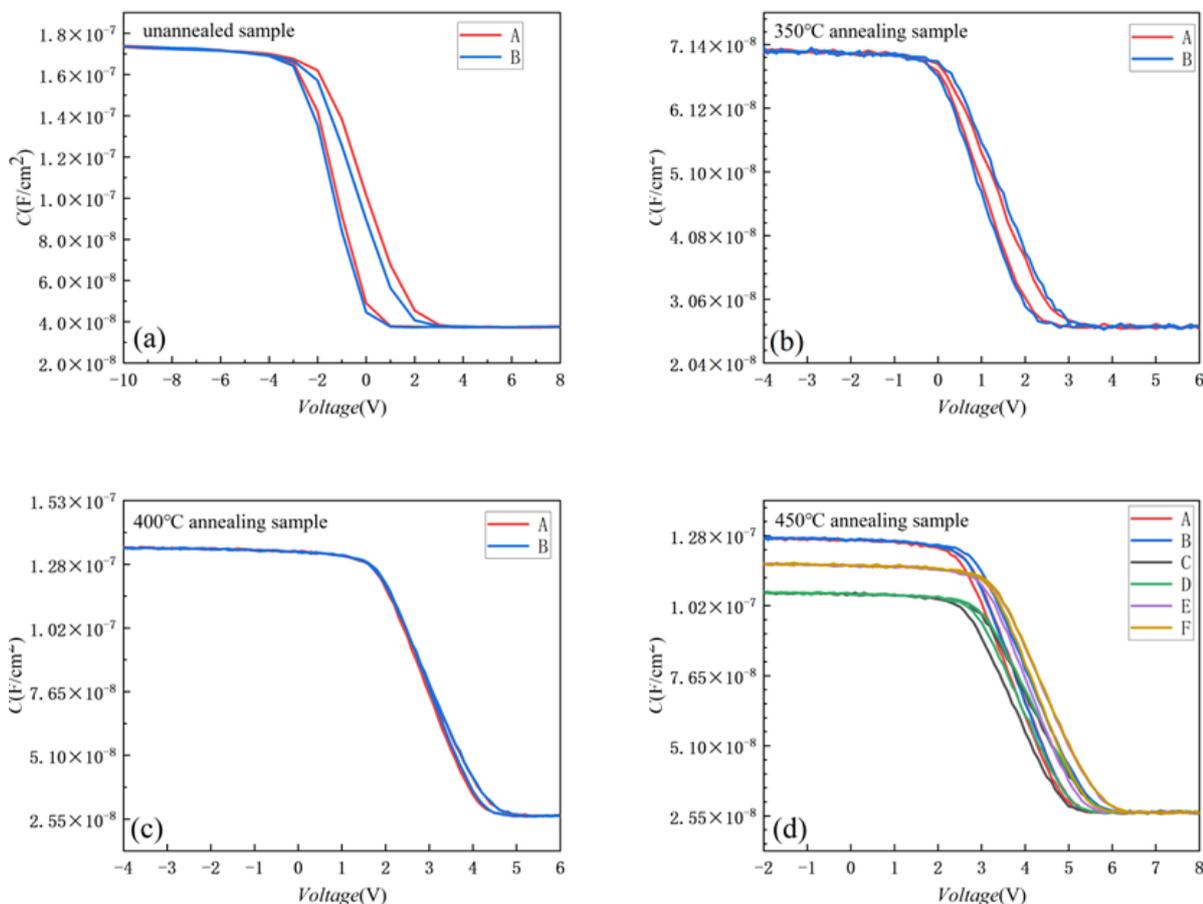


图 3 不同退火温度下 MOSCAP 器件电容-电压曲线

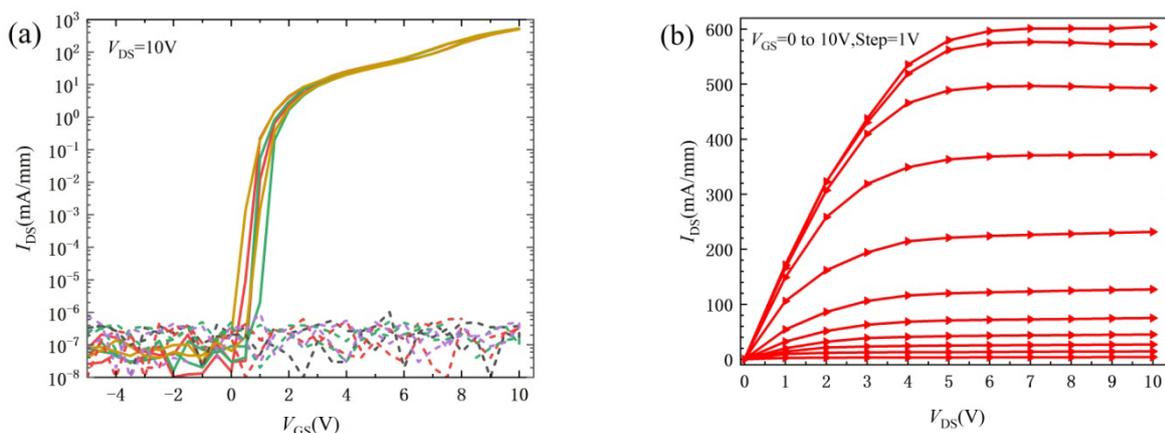
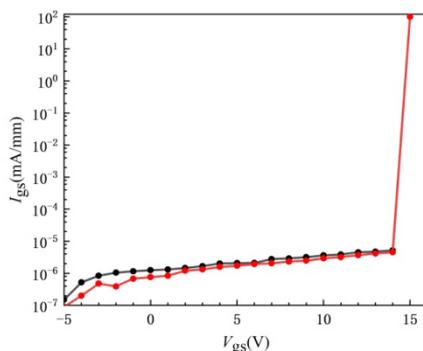


图 4 凹型栅 Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS HEMT 器件对数特性输出曲线 (a) 和线性输出曲线 (b)

图 5 凹型栅 Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS HEMT 器件的栅极击穿特性

4 总结

我们利用 MOSCAP 器件研究得到 400 °C 氮气退火 5 分钟可以增加 ALD Al₂O₃ 薄膜的击穿场强, 使薄膜中的负固定电荷提高一个量级, 并且降低了其中的移动电荷。在 GaN 基 HEMT 器件上验证, 经过 400 °C 后栅退火 (PGA) 制作的 Al₂O₃ AlGaIn/GaN MOS-HEMT 器件阈值电压 0.7 V, 亚阈值斜率 230 mV/dec, 栅极最大偏置电压 14 V, 饱和电流 600 mA/mm, 导通电阻为 5.88 Ω·mm, 10⁹ 的高导通/关态电流比、小于 10⁻⁸ A/mm 的低关态漏电流。该退火处理方案是一种简单有效的提高 MIS-HEMT 性能的方法, 在增强型 GaN 基功率器件的产品开发中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Huang Y P, Hsu W C, Liu H Y, et al. Enhancement-Mode Tri-Gate Nanowire InAlN/GaN MOSHEMT for Power Applications[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019:1-1.
- [2] Zhu M, Ma J, Nela L, et al. High-voltage normally-off recessed tri-gate GaN power MOSFETs with low on-resistance[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, PP(99):1-1.
- [3] Huang H, Sun Z, Cao Y, et al. Investigation of surface traps-induced current collapse phenomenon in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with schottky gate structures[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2018.
- [4] Sun Z, Cheng W, Gao J, et al. Improving Performances of Enhancement-Mode AlGaIn/GaN MIS-HEMTs on 6-inch Si Substrate Utilizing SiON/Al₂O₃ Stack Dielectrics[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, PP(99):1-1.
- [5] Sun N, Huang H, Sun Z, et al. Improving Gate Reliability of 6-In E-Mode GaN-Based MIS-HEMTs by Employing Mixed Oxygen and Fluorine Plasma Treatment[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022(69-1).
- [6] Nakazawa S, Shiozaki N, Negoro N, et al. Improved hysteresis in a normally-off AlGaIn/GaN MOS heterojunction field-effect transistor with a recessed gate structure formed by selective regrowth[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(9):091003.
- [7] Hashizume T, Nishiguchi K, Kaneki S, et al. State of the art on gate insulation and surface passivation for GaN-based power HEMTs[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 78.
- [8] Nakazawa S, Shih H A, Tsurumi N, et al. Fast switching performance by 20 A / 730 V AlGaIn/GaN MIS-HFET using AlON gate insulator[C]// 2017 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). IEEE, 2017.
- [9] Robertson J, Falabretti B. Band offsets of high K gate oxides on III-V semiconductors[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(1):5243-3.
- [10] M.D. Groner, Elam J W, Fabreguette F H, et al. Electrical characterization of thin Al₂O₃ films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrate[J]. Thin Solid Films, 2002.
- [11] Liu Z H, Ng G I, Arulkumaran S, et al. High Microwave-Noise Performance of AlGaIn/GaN MISHEMTs on Silicon With, Gate Insulator Grown by ALD[J]. Electron Device Letters, IEEE, 2010, 31(2):P.96-98.
- [12] Esposito M, Krishnamoorthy S, Nath D N, et al. Electrical Properties of Atomic Layer Deposited Aluminum Oxide on Gallium Nitride[J]. Applied Physics Letters, 2011,

- 99(13):063501.
- [13] Ganguly S, Verma J, Li G, et al. Presence and origin of interface charges at atomic-layer deposited Al₂O₃/III-nitride heterojunctions[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(19).
- [14] Marron T, Takashima S, Li Z, et al. Impact of annealing on ALD Al₂O₃ gate dielectric for GaN MOS devices[J]. Physica Status Solidi, 2012, 9(3-4):907-910.
- [15] Groner, M. D, Elam, et al. Electrical characterization of thin Al₂O₃ films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrates.[J]. Thin Solid Films, 2002.
- [16] 郝跃, 张金凤, 张进成. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件[M]. 科学出版社, 2013.
- [17] 施敏. 半导体器件物理与工艺[M]. 科学出版社, 1992.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS