

基于 Ga_2O_3 的场效应器件研究进展 *

高灿灿¹, 马 奎^{1,2}, 杨发顺^{1,2}

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 氧化镓(Ga_2O_3)作为第三代宽禁带半导体材料, 由于其超宽带隙、高击穿场强以及高巴利加优值等优点, 广泛应用于大功率器件等领域, 已成为近几年来国内外科研人员研究的热点。主要介绍了 Ga_2O_3 材料的特性, 总结了基于 Ga_2O_3 的场效应晶体管(FET)的研究进展, 对 Ga_2O_3 功率器件的发展进行了思考归纳。

关键词: Ga_2O_3 ; 宽禁带半导体; 场效应晶体管

中图分类号: TN4; O48

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200009

中文引用格式: 高灿灿, 马奎, 杨发顺. 基于 Ga_2O_3 的场效应器件研究进展[J]. 电子技术应用, 2020, 46(5): 22–26.

英文引用格式: Gao Cancan, Ma Kui, Yang Fashun. Overview of field effect transistors based on Ga_2O_3 [J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(5): 22–26.

Overview of field effect transistors based on Ga_2O_3

Gao Cancan¹, Ma Kui^{1,2}, Yang Fashun^{1,2}

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Semiconductor Power Device Reliability Engineering Research Center of Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

Abstract: As the third-generation wide bandgap semiconductor material, gallium oxide(Ga_2O_3) has been widely used in high-power devices and other fields due to its advantages such as ultra-wide band gap, high breakdown field strength and high BFOM. Hotspots of research by researchers at home and abroad. This paper mainly introduces the characteristics of Ga_2O_3 materials, summarizes the research progress of field-effect transistors(FETs) based on Ga_2O_3 , and summarizes the development of Ga_2O_3 power devices.

Key words: Ga_2O_3 ; wide bandgap semiconductor; field effect transistor

0 引言

氧化镓(Ga_2O_3)作为新兴的第三代宽禁带半导体, 具有超宽禁带、高击穿场强等优点。它是一种透明的氧化物半导体材料, 由于其优异的物理化学特性、良好的导电性以及发光性能, 在功率半导体器件、紫外探测器、气体传感器以及光电子器件领域具有广阔的应用前景^[1]。传统 Ga_2O_3 主要应用于 Ga 基半导体的绝缘层以及紫外滤光片, 目前国内外研究热点主要聚焦于大功率器件^[2]。 Ga_2O_3 有 5 种晶体结构, 分别为斜方六面体(α)、单斜晶系(β)、缺陷尖晶石(γ)、立方体(δ)以及正交晶体(ε)。 β - Ga_2O_3 因为高温下的稳定性, 所以逐渐成为近几年来国内外的研究热点^[3]。 β - Ga_2O_3 主要有以下优点:(1) β - Ga_2O_3 的禁带宽度为 4.8~4.9 eV, 击穿场强高达 8 MV/cm。巴利加优值是低损失性能指标, 而 β - Ga_2O_3 的巴利加优值高达 3 400, 大约是 SiC 的 10 倍、GaN 的 4 倍^[4]。因此, 在制造相同耐压的单极功率器件时, 元件的导通电阻比

SiC、GaN 低得多, 极大降低器件的导通损耗;(2)可以利用区熔法(Fz)、直拉法(Cz)、边缘定义的薄膜馈电生长(EFG)等熔融法^[5]来生长大尺寸、高质量的 β - Ga_2O_3 本征单晶衬底材料, 可以从大块单晶中得到 Ga_2O_3 晶片。相比较 SiC 和 GaN 生长技术, 更容易获得高质量、低成本的单晶材料;(3)可以利用分子束外延(MBE)、金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)、射频(RF)磁控溅射等方法生长高质量氧化镓外延层^[6]。可以对 Ga_2O_3 外延层进行 n 型掺杂, 相较于金刚石、SiC 等其他半导体材料, 方法更为简单。

但是 β - Ga_2O_3 的电子迁移率和热导率较低, 限制了其在高频大功率器件的应用。本文主要介绍国内外氧化镓的场效应晶体管(FET)的研究进展, 对 Ga_2O_3 功率器件存在的问题进行了思考与总结。

1 Ga_2O_3 场效应晶体管研究进展

1.1 本征衬底

1.1.1 顶栅 FETs

2012 年 1 月, NICT(日本信息通信研究机构)HIGA-

* 基金项目: 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心开放基金(010201)

综述与评论

Review and Comment

SHIWAKI M 等人^[7]研制出世界首款同质外延 Ga_2O_3 金属半导体场效应晶体管(MESFET)。器件剖面图如图 1(a)所示。采用分子束外延(MBE)的方法,在区熔法(FZ)制备的掺 Mg 半绝缘 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 衬底上生长了厚度为 300 nm 的 Sn 掺杂外延层。该晶体管表现出良好的直流器件特性,包括通过栅极电压对漏极电流的调制、漏极电流的完美夹断、超过 250 V 的关断状态击穿电压、约为 10^4 高漏电流开关比以及较小的栅极漏电流。上述特性展示了 Ga_2O_3 材料制备功率器件的优势,但是晶体管源漏接触电阻较高,此外,漏电流开关比受到 Ga_2O_3 表面未钝化的漏电流限制,晶体管的性能需要进一步的提升。于是,在 2013 年,HIGASHIWAKI M 等人^[8]以 20 nm Al_2O_3 为栅介质,通过 Si 离子注入源区和漏区来改善欧姆接触。器件结构见图 1(b)。器件的击穿电压为 370 V,电流开关比达到 10^{10} 。然而击穿场强仅为 0.46 MV/cm,远远低于 Ga_2O_3 的临界击穿场强,需要进一步优化器件结构来提高击穿场强。栅介质有效减小了栅漏电流,使漏电流开关比提高了 6 个数量级。

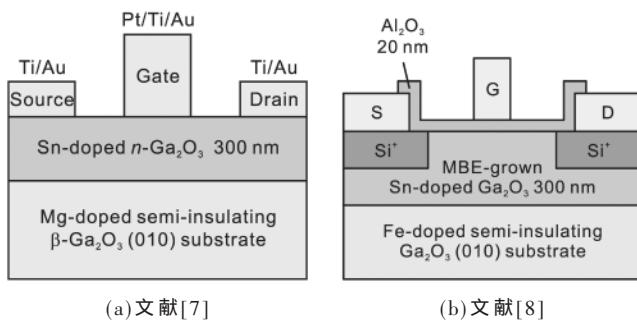
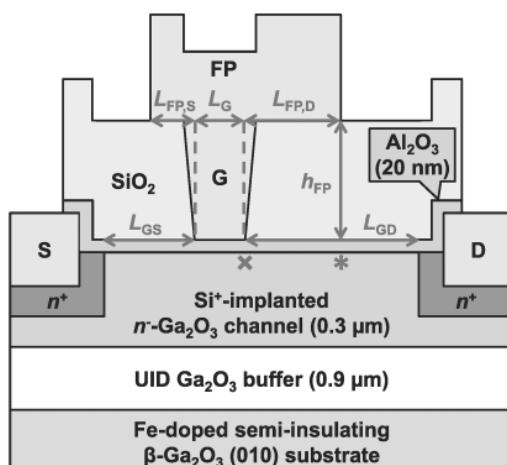


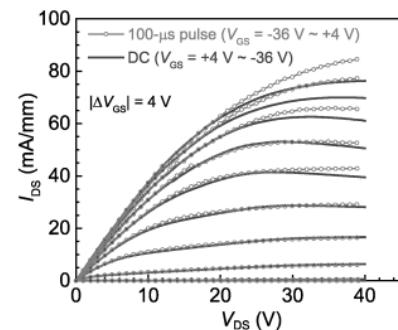
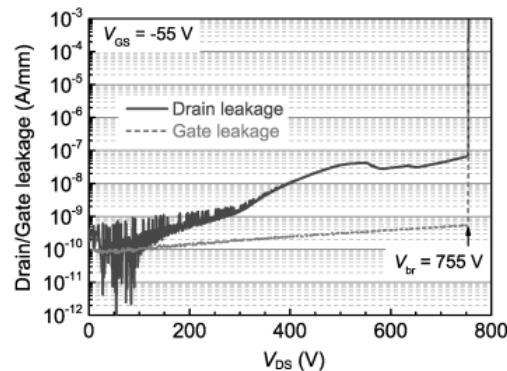
图 1 MOSFET 器件结构示意图

2016 年,WONG M H 等人^[9]利用 MBE 在 Sn 掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{Ga}_2\text{O}_3(010)$ 外延层上制备了击穿电压为 75 V 的耗尽型 MOSFET,此器件是第一个横向耗尽的晶体管,器件结构如图 2(a)所示。从图 2(b)看出,当栅压 4 V 时,最大漏端电流密度 78 mA/mm,漏电流开关比大于 10^9 ,开关击穿电压高达 755 V。图 2(d)为直流和脉冲条件下测得的输出特性曲线,从图中看出自热效应引起的电流减弱现象;随着工作温度从 25 °C 提高到 300 °C,漏电流开关比从 10^9 下降到 10^3 。因此,氧化镓自身的低导热系数引起的自热效应是制约器件性能的主要因素,热管理具有重要意义。

同年, GREEN A J 等人^[10]利用金属有机气相外延生长(MOVPE),在直拉法(CZ)生长的半绝缘 Mg 掺杂的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 衬底上生长了 Sn 掺杂浓度为 $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的(100) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的外延层,成功制备出耗尽型晶体管。晶体管击穿电压为 230 V,最大漏端电流密度为 60 mA/mm,漏电流开关比达到 10^7 。击穿场强高达 3.8 MV/cm,是现有文献中的最高值,但这一结果远小于 Ga_2O_3 的理论击穿场强。采用与 GREEN A J 等人制备的晶体管类似



(a) 截面示意图

(b) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FP-MOSFET 的直流和脉冲输出曲线

(c) 关态漏/栅电流密度及击穿曲线

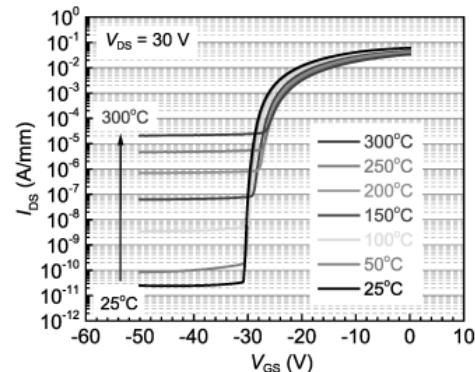
(d) $V_{ds}=30 \text{ V}$ 时随温度变化的传输特性^[9]

图 2 文献[9]相关数据

的同质外延结构,CHABAK K D 等人^[11]利用 BCl_2 等离

综述与评论

Review and Comment

子刻蚀，在掺 Mg 本征(100) β -Ga₂O₃ 衬底上制备了增强模式的绕栅鳍阵列场效应晶体管(finFETs)。鳍阵列通道有利于界面态耗尽，在无栅极偏压的情况下可以关闭。器件在栅极漏极间距为 21 μm 且无场板结构情况下实现了超过 600 V 的三端击穿电压，是目前报道的使用非平面器件通道的晶体管的最大值。TADJERD M J 等人^[12]采用(001) β -Ga₂O₃ 单晶作为衬底，HfO₂ 作为顶栅介质层制备了第一个阈值电压为 2.9 V 的剥离型 β -Ga₂O₃ 基正常关断增强型 MOSFET，这是第一次为 β -Ga₂O₃ MOS 接口测量正阈值电压的报告。在 $V_{DS}=80$ V 时发生击穿，计算得 $E_{br}=0.16$ MV/cm。

KE Z 等人^[13]首次报道了击穿电压超过 1.8 kV 的场板(FP)结构横向耗尽型 MOSFET，器件结构如图 3 所示。采用分子束外延(MBE)设备在 Fe 掺杂的 Ga₂O₃ 半绝缘衬底上外延得到 β -Ga₂O₃ 薄膜。外延材料从衬次往上依次是非故意掺杂缓冲层和 n 掺杂的 β -Ga₂O₃ 沟道层。沟道层沉积了 ALD/PECVD 生长的氧化物层，PECVD 生长的 SiO₂ 层与栅介质层之间采用 ALD 沉积的 Al₂O₃ 刻蚀层，有效提高了击穿电压。测试结果表明，击穿场强为 4.4 mV/cm，超过 Ga₂O₃ 理论击穿场强的 1/2，再一次展示了 Ga₂O₃ 基功率器件的巨大优势。

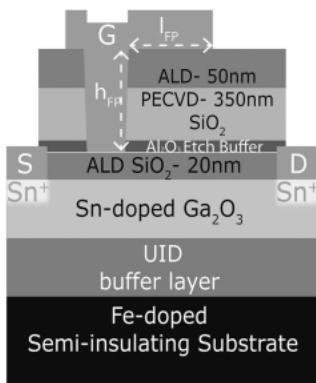


图 3 横截面视图

HU Z 等人^[14]在 Ga₂O₃(001) 衬底上采用卤化物气相外延层(HVPE)制备了高压垂直鳍状 Ga₂O₃ MISFET(金属-绝缘-半导体场效应晶体管)。区别于传统基于 PN 结的 MOSFET，该器件没有 P 区。在无场板的情况下，N 漂移区电荷浓度为 10¹⁶ cm⁻³，阈值电压为 1.2~2.2 V 时，器件的三端态击穿电压高达 1 057 V，漏电流开关比为 10⁸，导通电阻 R_{on} 为 13~18 Ω·cm²，晶体管展示出良好的栅极调制效应。这是首次报道具有增强模式工作的垂直场效应晶体管，是基于 Ga₂O₃ 的电力电子学的一个重要里程碑。

2017 年，KRISHNAMORTHY S 等人^[15]利用 Si 原子 δ 掺杂在 β -(Al_{0.2}Ga_{0.8})₂O₃/Ga₂O₃ 异质结下实现调制掺杂的二维电子气(2 DEG)，并采用 2 DEG 作为调制掺杂沟道实现了调制掺杂场效应晶体管，器件结构如图 4 所示。证实了在氧化物界面的二维电子气作为调制掺杂沟道，通过

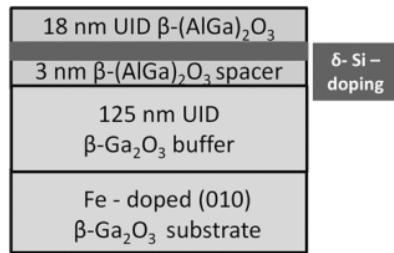
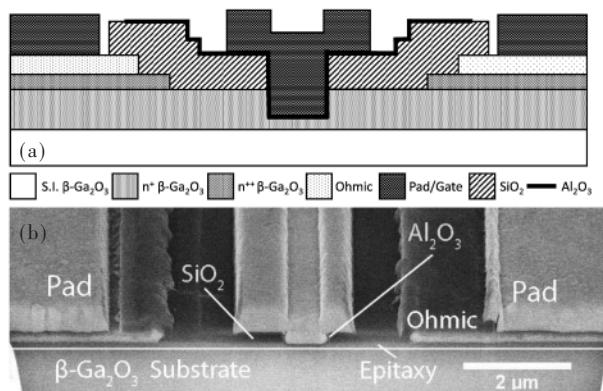


图 4 外延结构

电子从 β -(Al_{0.2}Ga_{0.8})₂O₃ 层转移到 Ga₂O₃ 层来提高载流子迁移率。2018 年，XIA Z 等人^[16]制备基于 Si 原子 δ 掺杂的 β -Ga₂O₃ 薄膜的 MESFET。晶体管电流开关比达到 10⁵，击穿电压 V_{br} 和击穿场强 E_{br} 分别是 170 V 和 1.3 MV/cm。峰值漏电流密度为 140 mA/mm、跨导为 34 mS/mm。在源区和漏区采用再生长工艺，通过 i 线光刻和 CF₄ 电感耦合等离子体反应离子刻蚀(ICP-RIE)完成图案，得到低接触电阻。结果表明，δ 掺杂对研究制备 Ga₂O₃ 高频场效应晶体管提供了有效方法。

1.1.2 高频射频(RF)FETs

2017 年，GREEN A J 等人^[17]首次报道了 β -Ga₂O₃ MOSFET 射频(RF)特性。使用一个新的高掺杂 n- β -Ga₂O₃ 欧姆帽层与亚微米栅凹槽工艺制备了射频(RF)MOSFET，如图 5 所示，沟道层覆盖 SiO₂ 和 Al₂O₃ 介质。晶体管电流密度和跨导分别为 150 mA/mm 和 21.2 mS/mm。非本征截止频率(FT)和最大振荡频率(F_{max})分别为 3.3 GHz 和 12.9 GHz，输出功率、功率增益和功率增加效率分别为 0.23 W/mm、5.1 dB 和 6.3%。以上数据表明， β -Ga₂O₃ 在功率开关和射频器件的单片或异构集成领域具有很大的潜力。

图 5 β -Ga₂O₃ MOSFET 的器件截面原理图(a)及该装置的聚焦离子束(FIB)截面图像(b)

1.2 异质衬底

HWANG W S 等人^[18]利用重掺杂 Si 衬底作为背栅、SiO₂ 作为介电层制备了一种剥离型 β -Ga₂O₃ 薄膜基 MOSFET，用常规光刻技术在沟道层上制作了漏极和源欧姆接触。 $V_{DS}=20$ V 时，迁移率为 70 cm²/(V.s)，电流开关

综述与评论

Review and Comment

比约为 10^7 , 亚阈值斜率(SS)高达 200 mV/dec , 这意味着器件可以很好地进行栅极调制。剥离型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜晶体管比采用MBE或MOPVE方法沉积的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜制备的晶体管具有更好的性能。在器件制备过程中, 剥离式 Ga_2O_3 膜的厚度和掺杂浓度是不可控的, 这可能会制约其工业化和规模化生产。

ZHOU H 等人^[19]用不同厚度的剥脱式 Ga_2O_3 薄膜制备晶体管, 器件原理图如图6所示。结果表明, 器件的阈值电压主要取决于剥离膜的厚度, 随着厚度的增加, 阈值电压甚至从一个正值变为负值。随后, 他们将剥离的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄片转移到 Si/SiO_2 衬底上制备晶体管, 得到了目前报道的最高值漏电流密度, 耗尽/增强模式下分别为 1.5 A/mm 和 1.0 A/mm ^[20]。饱和漏电流约是箝缩电流的10个数量级, 击穿场强高达 2 MV/cm 。另外, 尽管 SiC 带隙低、成本高, 导热系数比蓝宝石大, 但仍不适合用作 Ga_2O_3 基晶体管衬底。而采用蓝宝石衬底代替 Si 衬底, 解决了 Ga_2O_3 低热导率的问题, 大大提高了漏电流。高漏极电流、低导通电阻和宽禁带等优点使得绝缘体场效应晶体管在未来电力电子学领域有广阔的应用前景。

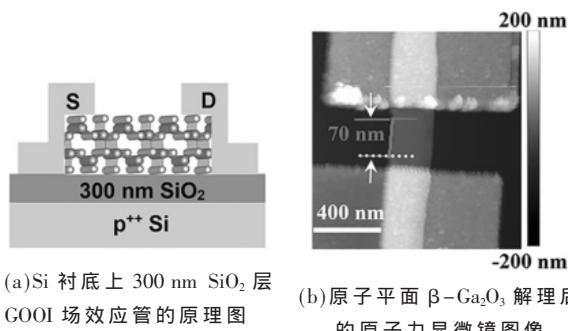


图6 文献[19]相关成果

2 结论

本文对 Ga_2O_3 材料特性进行了介绍, 主要研究了 Ga_2O_3 场效应晶体管的发展现状, 分析了不同结构FET的器件特性。表1给出了目前报道的几种典型的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基场效应晶体管的基本性能参数。对 Ga_2O_3 功率器件发展过程中存在的问题总结如下:

表1 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FET的特性

器件类型	文献	衬底材料	V_{th}/V	$E_{\text{bd}}/(\text{MV/cm})$	$J_{\text{max}}/(\text{mA/mm})$	$I_{\text{on/off}}$ ratio	$\text{SS}/(\text{mV/dec})$	$g_{\text{m}}/(\text{mS/mm})$
增强模式 MOSFET	[21]	(010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	428/62.4	2.8/3.2	1.4	10^6	150	39
增强模式 MOSFET	[22]	(010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	198/505	1.98/1.44	40	10^9	-	7
耗尽模式垂直-MOSFET	[23]	(001) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	-	-	-	10^3	-	-
栅极凹槽设计的 MOSFET	[24]	(010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	122/190	-	20.7/2.6	10^8	-	-
Ge掺杂沟道层 MOSFET	[25-26]	(010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	479	0.87	>75	$>10^8$	300	-
Δ 掺杂-MOSFET	[27]	(010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	51	-	236	-	-	26
准2D异质结构结构 MISFET	[28]	P型 Si	-48/-24(背栅/顶栅)	-	-	$10^6/10^7$	502/348	0.03/0.05
双异质结构 MEFET	[29]	(010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	428/62.4	2.8/3.2	257	10^8	150	39

(1)P型掺杂技术的不成熟、低载流子迁移率和自热效应是制约 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基功率器件发展的重要因素。

(2) Ga_2O_3 的低导热系数引起的自热效应限制了器件性能, 需要不断改进 Ga_2O_3 功率器件的热管理方法来降低自热效应的危害, 实现更高的热导率。

(3)实现高性能晶体管的关键是调制掺杂异质结。此外, δ 掺杂有望实现器件的高电流密度或高迁移率。

(4)掺杂浓度、接触电阻、离子注入、再生层的高掺杂技术是提高功率器件性能的关键因素。

参考文献

- [1] Zhou Hong, Zhang Jincheng, Zhang Chunfu, et al. A review of the most recent progresses of state-of-art gallium oxide power devices[J]. 半导体学报(英文版), 2019(1): 33-50.
- [2] Dong Hang, Xue Huiwen, He Qiming, et al. Progress of power field effect transistor based on ultra-wide bandgap Ga_2O_3 semiconductor material[J]. 半导体学报(英文版), 2019(1): 17-25.
- [3] HIGASHIWAKI M, JESSEN G H. Guest editorial : the dawn of gallium oxide microelectronics[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(6): 060401.
- [4] KIM M, SEO J H, SINGISETTI U, et al. Recent advances in free-standing single crystalline wide band-gap semiconductors and their applications : GaN, SiC, ZnO, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, and diamond[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5 (33): 10.1039.C7TC02221B.
- [5] 杨丹丹, 金雷, 张胜男, 等. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 单晶腐蚀坑形貌研究[J]. 微纳电子技术, 2019(6): 435-439.
- [6] 孙学耕, 张智群. Ga_2O_3 功率器件研究现状和发展趋势[J]. 半导体技术, 2018(4): 241-249.
- [7] HIGASHIWAKI M, SASAKI K, KURAMATA A, et al. Gallium oxide(Ga_2O_3) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (010) substrates[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(1): 013504.
- [8] HIGASHIWAKI M, SASAKI K, KAMIMURA T, et al. Depletion-mode Ga_2O_3 metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on $\tilde{\Gamma}\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (010) substrates and temperature dependence of their device characteristics[J]. Applied

综述与评论 Review and Comment

- Physics Letters, 2013, 103(12): 013504.
- [9] WONG M H, SASAKI K, KURAMATA A, et al. Electron channel mobility in silicon-doped Ga_2O_3 MOSFETs with a resistive buffer layer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(12): 1202B9.
- [10] GREEN A J, KELSON D, CHABAK K D, et al. 3.8-MV/cm Breakdown Strength of MOVPE-Grown Sn-Doped, β - Ga_2O_3 MOSFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(7): 902–905.
- [11] CHABAK K D, MOSER N, GREEN A J, et al. Enhancement-mode Ga_2O_3 wrap-gate fin field-effect transistors on native(100) β - Ga_2O_3 substrate with high breakdown voltage[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(21): 213501.
- [12] TADJER M J, MAHADIK N A, WHEELER V D, et al. Editors' Choice communication—A(001) β - Ga_2O_3 MOSFET with +2.9 V threshold voltage and HfO_2 gate dielectric[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2016, 5(9).
- [13] KE Z, ABHISHEK V, UTTAM S. 1.85 kV breakdown voltage in lateral field-plated Ga_2O_3 MOSFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(9): 1385–1388.
- [14] Hu Zongyang, KAZUKI N, Li Wenshen, et al. Enhancement-mode Ga_2O_3 vertical transistors with breakdown voltage >1 kV[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(6): 869–872.
- [15] KRISHNAMOORTHY S, XIA Z, JOISHI C, et al. Modulation-dope β -($\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}$)₂ O_3 / Ga_2O_3 field-effect transistor[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(2): OZ3502.
- [16] Xia Z, Joishi C, Krishnamoorthy S, et al. Delta doped β - Ga_2O_3 field effect transistors with regrown ohmic contacts[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(4): 568–571.
- [17] GREEN A J, CHABAK K D, BALDINI M, et al. β - Ga_2O_3 MOSFETs for radio frequency operation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(6): 790–793.
- [18] HWANG W S, VERMA A, PEELAERS H, et al. High-voltage field effect transistors with wide-bandgap β - Ga_2O_3 nanomembranes[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(20): 203111.
- [19] ZHOU H, MAIZE K, QIU G, et al. β - Ga_2O_3 on insulator field-effect transistors with drain currents exceeding 1.5 A/mm and their self-heating effect[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(9): 092102.
- [20] ZHOU H, SI M, ALGHAMDI S, et al. High-performance depletion/enhancement-mode β - Ga_2O_3 on insulator(GOOI) field-effect transistors with record drain currents of 600/450 mA/mm[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(1): 103–106.
- [21] WONG M H, NAKATA Y, KURAMATA A, et al. Enhancement-mode Ga_2O_3 MOSFETs with Si-ion-implanted source and drain[J]. Applied Physics Express, 2017, 10(4): 041101.
- [22] CHABAK K D, MCCANDLESS J P, MOSER N A. Recessed-gate enhancement-mode β - Ga_2O_3 MOSFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 39(1): 67–70.
- [23] SASAKI K, THIEU Q T, WAKIMOTO D, et al. Depletion-mode vertical Ga_2O_3 trench MOSFETs fabricated using Ga_2O_3 homoepitaxial films grown by halide vapor phase epitaxy[J]. Applied Physics Express, 2017, 10(12).
- [24] LV Y, MO J, SONG X, et al. Influence of gate recess on the electronic characteristics of β - Ga_2O_3 MOSFETs[J]. Superlattices & Microstructures, 2018, 117: 132–136.
- [25] MOSER N, MCCANDLESS J, CRESPO A, et al. Ge-doped β - Ga_2O_3 MOSFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(6): 773–778.
- [26] PRATIYUSH A S, MUAZZAM U U, KUMAR S, et al. Optical float-zone grown bulk β - Ga_2O_3 -based linear MSM array of UV-C photodetectors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(12): 923–926.
- [27] KRISHNAMOORTHY S, XIA Z, BAJAJ S, et al. Delta-doped beta-gallium oxide field effect transistor[J]. Applied Physics Express, 2017, 10(5).
- [28] KIM J, MASTRO M A, TADJER M J, et al. Quasi-two-dimensional h BN/ β - Ga_2O_3 heterostructure metal-insulator-semiconductor field-effect transistor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(25): 21322–21327.
- [29] ZHANG Y, NEAL A, XIA Z, et al. Demonstration of high mobility and quantum transport in modulation-doped, β -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$)₂ O_3 / Ga_2O_3 , heterostructures[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(17): 173502.

(收稿日期: 2020-01-04)

作者简介:

高灿灿(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 半导体功率器件。

马奎(1985-), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向: 半导体集成技术、集成电路可靠性、功率器件和功率集成。

杨发顺(1976-), 通信作者, 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向: 半导体功率器件与功率集成技术、半导体集成电路设计。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所