Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2024)09-1044-07

# 集成侧墙技术的80 nm 栅GaN HEMT

孔 欣

(中国电子科技集团公司 第二十九研究所,四川 成都 610036)

摘 要:目前业界主要采用电子束曝光技术制作高频氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)的深亚微米T型栅,存在效率低下、良率不足和成本较高的问题。本文采用集成侧墙技术,在6英寸工业化产线上首次成功制造了纯光学曝光的80 nm T型栅GaN HEMT,并对器件性能参数进行了全面表征和分析。器件单位栅宽(每毫米)下,最大输出电流 I<sub>d.max</sub>为993 mA,峰值跨导 G<sub>m.peak</sub>为385 mS;阈值电压 U<sub>th</sub>为-3.25 V,关态击穿电压超过80 V;电流增益截止频率(f<sub>T</sub>)和功率增益截止频率(f<sub>max</sub>)分别为64 GHz和175 GHz。在28 V工作时,器件在16 GHz下的饱和输出功率、功率增益和功率附加效率分别为26.95 dBm(每毫米4.9 W)、11.08 dB和49.78%;在30 GHz下器件的饱和输出功率、功率增益和功率附加效率分别为26.15 dBm(每毫米4.1 W)、8.8 dB和44%。结果表明,集成侧墙技术在深亚微米 GaN HEMT 制造中具备较好的应用前景。

关键词:氮化镓高电子迁移率晶体管;光学栅;侧墙;短沟道效应;深亚微米

中图分类号:TN385;TN306 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA2023413

## 80 nm T-gate GaN HEMT with integrated sidewall technology

#### KONG Xin

(The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** As the main-stream technology to fabricate the deep-submicron T-gates of high-frequency GaN HEMT(High Electron Mobility Transistor) in industry, electron beam lithography faces the problems of low efficiency, insufficient yield, and high cost. In this paper, an 80 nm T-gate GaN HEMT with pure optical exposure has been successfully manufactured for the first time on a 6-inch industrial production line using integrated side wall technology, and the performance parameters of the device are comprehensively characterized and analyzed. The device displays a maximum output current per unit (millimeter) gate width of 993 mA, a peak transconductance of per unit (millimeter) gate width 385 mS, a threshold voltage of -3.25 V, an off-state breakdown voltage exceeding 80 V, and a  $f_T/f_{max}$  of 64/175 GHz. When operated at 28 V, the saturated output power, the associated power gain, and the power added efficiency of the device at 16 GHz are 26.95 dBm(4.9 W per millimeter), 11.08 dB, and 49.78% respectively; while at 30 GHz, these data are 26.15 dBm(4.1 W per millimeter), 8.8 dB, and 44% respectively. The results show that the integrated sidewall technology has a good application prospect in deep-submicron GaN HEMT manufacturing.

**Keywords:** GaN High Electron Mobility Transistor; optical gate; sidewall; short channel effect; deep-submicron

氮化镓(GaN)材料及其异质结器件具有禁带宽度大、电子饱和漂移速度高、击穿电场高等诸多优势,使氮化 镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)逐渐成为射频/微波功率放大器的首选器件。GaN HEMT 具有高功率密度、高 功率附加效率(Power Added Efficiency, PAE)、高增益以及易于实施阻抗匹配等特点,可有效提高射频工作链路 的整体效率<sup>[1-3]</sup>。当前,GaN 微波功率器件的技术发展呈现出两种趋势:一种是在Ku 波段及以下稳步推进GaN 功率器件和电路模块的成熟商业化应用<sup>[4-8]</sup>;另一种则是进一步拓展器件的工作频段,目前已进入到毫米波频段 (Ka、V、W 甚至是G 波段)<sup>[9-10]</sup>。2010年,美国麻省理工学院的W Jinwook等<sup>[11]</sup>采用凹槽欧姆技术,按照等比例

收稿日期: 2023-12-14; 修回日期: 2024-01-12

原则缩小器件各项物理尺寸,成功研制出栅长仅为60 nm的AlGaN/GaN HEMT,其功率增益截止频率 $f_{max}$ 首次突破了 300 GHz。同年,美国HRL实验室的K Shinohara 等<sup>[12]</sup>采用再生欧姆技术制备了栅长仅为40 nm的低导通电阻 AlN/GaN/AlGaN 双异质结 HEMT,器件电流增益截止频率 $f_T$ 为 220 GHz, $f_{max}$ 高达 400 GHz。仅仅两年之后,K Shinohara 等<sup>[13]</sup>融合自对准栅工艺、n型重掺杂 GaN 欧姆接触等先进技术,研制成功了 20 nm 栅长增强型 AlN/GaN/AlGaN 双异质结 HEMT,再次将 $f_T$ 推高到 342 GHz, $f_{max}$ 更是高达 518 GHz。

文献[9-13]中报道的 GaN HEMT 栅长均在 100 nm 以下,无一例外都采用了电子束直写曝光技术,其原因在 于传统的接触式/接近式光刻机或步进式光刻机无法实现深亚微米级别(0.25 μm 及以下)的光刻精确度。由于电子 束直写曝光速度较慢,且存在良率不足的问题,客观上导致了高昂的制造成本,制约了深亚微米 GaN HEMT 的 工业化生产和大规模应用。目前,引入的缩胶技术或侧墙技术均可突破传统光学曝光技术特征尺寸的限制,制 作出更短栅长的 GaN 器件<sup>[14-15]</sup>。台湾稳懋公司采用缩胶技术,成功使用 i-line 步进式光刻机制作出 0.25 μm 细线 条,并基于此发布了 NP25 工艺<sup>[14]</sup>。美国 CREE 公司则在其代表性的 G40V4 工艺技术中引入 SiN 侧墙技术,将光 学曝光得到的 0.4 μm 栅线条进一步缩小至 0.25 μm,从而开发了一套基于光学曝光技术的 0.25 μm GaN HEMT 工 艺技术。该技术性能优异,工作电压高达 40 V, 10 GHz 和 14 GHz 下功率密度大于 7 W/mm,非常适合用于 Ku 波 段以下的分立功率管芯和单片集成电路制作<sup>[15]</sup>。可见,侧墙技术在商用工艺上已取得成功。

本文工作依托工业化产线,采用光学曝光和缩胶工艺在6英寸碳化硅基氮化镓外延片上制作0.25 μm 细栅线 条,再集成介质侧墙技术,成功制作出栅长为80 nm 的AlGaN/GaN HEMT,并对其性能进行全面的测试表征。通 过对比分析,器件各方面性能表现良好,充分展示了集成侧墙技术在100 nm 以下栅长 GaN HEMT 制作时的应用 前景。

#### 1 侧墙技术

典型的GaN HEMT 自对准T型栅制作流程为: a) 在晶圆表面先行生长一层SiN 薄膜; b) 曝光显影,暴露出待刻蚀细线条区域,以光刻胶为刻蚀掩膜在感应耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)设备中对暴露出的SiN介质进行低损伤刻蚀形成栅足; c) 去除光刻胶掩膜,匀涂负性光刻胶,经曝光显影定义T型栅栅帽; d) 通过电子束蒸发工艺制作栅金属,并经剥离工艺形成栅电极<sup>[16]</sup>。

侧墙技术是在上述典型T型栅制作流程基础上,通过在栅足侧壁额外附着介质进一步缩小器件栅长。图1为 侧墙技术流程示意图: a)在已完成源漏电极欧姆接触制作的GaN晶圆上淀积SiN介质(图1(a)); b)采用步进式光 刻机曝光显影形成细栅线条,在ICP设备中完成SiN低损伤刻蚀后去除光刻胶掩膜(图1(b)); c)在晶圆表面再次 生长一层SiO<sub>2</sub>介质,该介质将沿着晶圆表面和SiN侧壁附着(图1(c)); d)再次使用ICP设备,通过优化工艺气体 配比、腔室压力、射频源功率和偏置功率等关键工艺参数,形成各项异性刻蚀,将位于栅足底部的SiO<sub>2</sub>介质完 全去除,而附着在SiN侧壁的SiO<sub>2</sub>介质则会部分保留,从而实现栅长缩小(图1(d))。



Fig.1 Process flow of the sidewall technology 图1 侧墙技术流程示意图

### 2 器件制作

用于器件制作的 AlGaN/GaN 外延结构采用金属有机化合物气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)法生长于6英寸4H-SiC衬底之上,外延层由下至上依次为:50 nm厚的 AlN 成核层、1.6 μm厚的 GaN 缓冲和沟道层、0.7 nm厚的 AlN 空间插入层、20 nm厚的 AlGaN 势垒层(Al组份为 23.5%)以及位于最表面的 1.2 nm厚的 GaN 帽层。所有外延层均未故意掺杂。室温下的霍尔测量表明,二维电子气面密度为 0.9×10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>,载流子 迁移率为 2 270 cm<sup>2</sup>/(V·s),方块电阻为 305 Ω/□。

器件源漏欧姆接触采用 Ti/Al/Ni/Au 多层金属体系在 N<sub>2</sub>氛围下快速热退火形成,退火温度为(850±10)℃,时 间(30±5) s。利用传输线模型法(Transmission Line Method, TLM)设计电阻测试图形(图2(a)),采用四探针法测试 得到不同焊盘间距所对应的电阻值。通过线性曲线拟合得到曲线斜率为4.1696、截距为14.5。测试焊盘宽度为 75 μm, 欧姆接触电阻率为 0.54 Ω·mm, 方阻为 312 Ω/□, 比接触电阻率为 9.28×10<sup>-6</sup> Ω·cm<sup>2</sup>。随后采用等离子体 增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)系统生长一层 100 nm 厚的 SiN 介质作为 支撑层,然后通过不同能量和剂量的硼离子多次注入实现器件间隔离,隔离漏电为10<sup>-10</sup>A级别;接着在i-line步 进式光刻机(365 nm 波长光源)中光刻出细栅线条,特征尺寸约为0.4 μm,通过缩胶工艺将特征尺寸缩小至(0.18± 0.02) µm。随后以光刻胶为掩膜,采用 ICP 设备刻蚀 SiN 介质,由于存在少许侧向刻蚀,刻蚀之后 SiN 细线条特 征尺寸增大至(0.22±0.02) µm。接下来通过 PECVD 工艺再次沉积一层厚度为 100 nm 的 SiO, 作为后续侧墙工艺刻 蚀的牺牲层,在ICP设备中通过调高刻蚀过程中的偏置功率及优化腔室压力,提高等离子体刻蚀的各项异性,将 栅线条底部的SiO,完全刻蚀,同时保留部分侧壁的SiO,。刻蚀完成后的栅线条俯视图照片如图3所示,图中展示 了晶圆上下左右4个监控点的栅线条照片,线条宽度均在70 nm 附近。可见通过上述方法成功实现了栅线条特征 尺寸的缩小。随后匀涂覆胶经曝光显影形成栅帽图形,继而蒸发栅金属再经剥离工艺完成栅电极制作。栅金属 采用Ni/Pt/Au体系,厚度为50/500 nm。栅极制作完成之后生长第二层SiN介质对T型栅进行支撑保护,后续 继续完成布线工艺,实现多栅指器件栅、源、漏各电极的分别互联。转入背面工艺后首先在晶圆正面匀涂保护 层并将晶圆翻转后反扣键合至载片上,随后将晶圆减薄至(100±5)μm,再通过ICP刻蚀制作背面通孔并通过电镀 实现孔金属化互联。图4(a)为完成所有工艺之后的器件显微镜照片,器件栅宽为2×50 μm,源漏间距为3.0 μm。图 4(b)为T型栅断面电镜照片,栅长约为80 nm。



Fig.2 TLM test pattern and the linear fitting of resistance versus pad spacing 图 2 TLM测试图形及电阻拟合曲线

(a) optical image



Fig.3 SEM picture of the gate pattern after SiO<sub>2</sub> sacrifice layer etching 图 3 SiO<sub>2</sub>牺牲层刻蚀完成后栅线条的电镜照片

## 3 测试结果

#### 3.1 直流测试

采用半导体参数分析仪测试器件的直流特性。输出 *I*-*U*曲线如图 5 所示,在 *U*<sub>gs</sub>=+1 V、*U*<sub>ds</sub>=10 V时,2×50 μm 器件单位栅宽(每毫米)下最大输出电流为 *I*<sub>d,max</sub>=993 mA,开启电阻 *R*<sub>on</sub>=1.66 Ω。图 6 为器件的转移特性曲线,在 *U*<sub>ds</sub>=10 V时,器件单位栅宽(每毫米)下最大跨导为 *G*<sub>m,peak</sub>=385 mS,阈值电压 *U*<sub>th</sub>=-3.25 V。图 7 为采用源漏电流注 入法(单位栅宽(每毫米)下漏极电流 *I*<sub>ds</sub>=1 mA, *U*<sub>ds</sub>范围为 0~-8 V,步进-0.5 V)测量得到的器件关态击穿电压 *U*<sub>bk</sub>,器件 *U*<sub>bk</sub>超过 80 V,满足 28 V下工作要求。







Fig.7 Off-state breakdown characteristics of the GaN HEMT with 2×50 µm gate width 图 7 2×50 µm 器件关态击穿特性



(b) cross-sectional image

Fig.4 Optical image of the 2×50 μm GaN HEMT and the crosssectional image of the T-gate captured by SEM 图 4 2×50 μm 栅宽 GaN HEMT 显微镜照片及

80 nm T型栅的断面电镜照片

Fig.6 DC transfer characteristics of the GaN HEMT with 2×50 µm gate width 图 6 2×50 µm 器件直流转移特性



Fig.8 Current gain and maximum available gain versus frequency for GaN HEMTs with 2×50 μm gate width 图 8 2×50 μm GaN HEMT 器件的电流增益和最大 可用增益曲线

1048

采用 Agilent N5247A 矢量网络分析仪对 2×50 μm 器 件 *S* 参数进行晶圆上测试,测试频率范围为 100 MHz~ 67 GHz,步进为 100 MHz。根据 *S* 参数测试结果可以换 算得到器件的电流增益曲线( $H_{21}$ )和最大可用增益 (Maximum Available Gain, MAG)曲线,如图 8 所示。采 用每 10 倍频程增益滚降 20 dB(-20 dB/dec)的方法可外推 得到器件的 $f_{T}$ 和 $f_{max}$ 分别为 64 GHz 和 175 GHz(偏置为  $U_{ds}=20$  V,  $I_{ds}=20$  mA)。

#### 3.3 负载牵引测试

采用 Focus 公司 8~50 GHz 负载牵引系统对 2×50 µm 器件进行大信号连续波(Continuous Wave, CW)功率测 试,测试频点为 16 GHz 和 30 GHz,器件漏偏置电压为 +28 V,源漏电流设为 20 mA,为深 AB类偏置。在较小 输入功率下针对传输增益对器件输入端进行阻抗牵引, 得到输入阻抗等增益圆图。随后在较大输入功率(增益 压缩 3 dB 左右)下针对输出功率对器件输出端进行阻抗 牵引,得到输出阻抗等功率圆图。分别选取输入端最大 增益阻抗和输出端最大功率阻抗,进行功率扫描,得到 器件的输出功率、增益和 PAE,如图 9 所示。在 16 GHz 下器件的饱和输出功率、功率增益和功率附加效率分别 为 26.95 dBm(每毫米 4.9 W)、11.08 dB 和 49.78%(见图 9 (a));在 30 GHz 下器件的饱和输出功率、功率增益和功 率附加效率分别为 26.15 dBm(每毫米 4.1 W)、8.8 dB 和 44%(见图 9(b))。





## 4 分析讨论

通过集成侧墙技术在6英寸SiC基GaN外延片上成功制作了栅长为80 nm的HEMT器件并进行了DC、S参数和负载牵引测试。相关结果与美国QORVO公司和台湾稳懋公司公开报道的0.15 μm GaN HEMT性能指标对比情况详见表1。

	表1 GaN 社	希件性能对比	
	Table1 Performance co	omparison of GaN HEMTs	
item	QORVO <sup>[17]</sup>	WIN <sup>[14]</sup>	this work
wafer size/in	4	4	6
gate length/µm	0.15	0.15	0.08
gate width/µm	8×50	2×50	2×50
$I_{\rm d,max}/{\rm mA}$	1150	NA	993
$G_{\rm m.peak}/{\rm mS}$	425	420	385
$\hat{U}_{\rm th}/{ m V}$	-3.1	NA	-3.25
$U_{\rm bk}/{ m V}$	75	90	80
$f_{\rm T}/{\rm GHz}$	32.5	42	64
$f_{\rm max}/{\rm GHz}$	160	115	175
power/W	$3.0@30 \text{ GHz}, U_{ds}=20 \text{ V}$	4.3@29 GHz, U <sub>ds</sub> =28 V	4.1@30 GHz, U <sub>ds</sub> =28 V
associated power gain/dB	$8.0@30 \text{ GHz}, U_{ds} = 20 \text{ V}$	7.0@29 GHz, $U_{ds} = 28 \text{ V}$	8.8@30 GHz, U <sub>ds</sub> =28 V
PA F/%	50@30  GHz U = 20  V	30 9@29 GHz U =28 V	44@30 GHz U = 28 V

首先应指出的是,本工作基于6英寸GaN晶圆完成,而对照组则是采用4英寸GaN晶圆开展工作。由于4英 寸晶圆成熟度较6英寸晶圆更高,因此本工作更具挑战性。从测试结果看,本工作器件单位栅宽(每毫米)下最大输 出电流*I*<sub>d,max</sub>仅为993 mA,明显低于同行数据,表明在刻蚀SiO<sub>2</sub>牺牲层时极有可能造成了沟道损伤,导致载流子 浓度下降。器件单位栅宽(每毫米)下最大跨导*G*<sub>m,peak</sub>为385 mS,显著低于对照组结果,这是由于势垒层厚度为 20 nm 且具备1.2 nm 厚的GaN 帽层,80 nm 栅长器件对应的纵横比仅为3.77,在此情形下,器件栅极对沟道的调 控能力已明显不足,存在一定的短沟道效应,造成了最大跨导偏低<sup>[18-19]</sup>。器件关态击穿电压超过 80 V,支持 28 V下工作。器件f<sub>T</sub>和f<sub>max</sub>分别为 64 GHz 和 175 GHz,优于 QORVO 和台湾稳懋公司 0.15 μm 栅长器件的数据,但 低于 80 nm 栅长器件典型水平,原因有两个方面:一是 G<sub>m,peak</sub>偏低;二是器件栅帽尺寸接近 1.0 μm,造成 C<sub>gs</sub>和 C<sub>gd</sub>偏大,表明在寄生效应明显的情形下单纯依靠缩小栅长已难以继续提升器件特征频率<sup>[20]</sup>。30 GHz 下器件的输 出功率密度、功率增益以及功率附加效率与 QORVO 和 WIN 的结果相比各有优劣,但鉴于上述两家公司当前的技 术水平较文献报道已取得较大进步,因此本工作虽取得不错结果,但仍有继续提升的空间。

按照上述分析,后续可从以下方面开展进一步优化工作:首先,对外延结构进行优化,通过薄势垒结构提高纵横比,或引入背势垒结构提高载流子限域特性,抑制短沟道效应<sup>[21-22]</sup>;其次,对栅帽尺寸进行优化,将栅帽宽度控制在 0.5 µm 左右,从而降低 C<sub>gs</sub>和 C<sub>gd</sub>,提高器件高频特性<sup>[23]</sup>;最后,可对牺牲层干法刻蚀工艺进行优化,降低刻蚀损伤<sup>[24]</sup>,或在牺牲层刻蚀后引入 350~400 ℃高温退火,进行损伤修复<sup>[25]</sup>。

#### 5 结论

本文依托工业化制造技术,通过集成侧墙技术在6英寸晶圆上首次制作出栅长为80 nm的GaN HEMT并对其 直流和射频特性进行了测试表征。器件单位栅宽(每毫米)下最大输出电流 *I*<sub>d,max</sub>为993 mA,最大跨导*G*<sub>m,peak</sub>为 385 mS,阈值电压 *U*<sub>th</sub>为-3.25 V,关态击穿电压 *U*<sub>bk</sub>超过 80 V;器件*f*<sub>T</sub>和*f*<sub>max</sub>分别为64 GHz和175 GHz。在 16 GHz下器件的饱和输出功率、功率附加增益和功率附加效率分别为26.95 dBm(每毫米4.9 W)、11.08 dB和 49.78%;在 30 GHz下器件的饱和输出功率、功率附加增益和功率附加效率分别为26.15 dBm(每毫米4.1 W)、 8.8 dB和44%。器件具备良好的综合性能,展现出侧墙技术在深亚微米GaN HEMT器件制作中良好的工程化应用 前景。此外,器件尚存在刻蚀损伤大、栅控能力不足、短沟道效应、*C*<sub>gs</sub>和*C*<sub>gd</sub>寄生电容过大等不足,限制了器件 性能指标的继续提升,后续可从外延结构设计、T型栅制作、牺牲层刻蚀损伤控制与刻蚀后修复等角度开展进一 步研究。

#### 参考文献:

- [1] 任健,要志宏.S波段GaN MMIC Doherty 功率放大器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):363-367. (REN Jian, YAO Zhihong. Design of S-band GaN MMIC Doherty power amplifier[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):363-367.) doi:10.11805/TKYDA201802.0363.
- [2] KUCHTA D,GRYGLEWSKI D,WOJTASIAK W. A GaN HEMT amplifier design for phased array radars and 5G new radios[J]. Micromachines, 2020,11(4):398. doi:10.3390/mi11040398.
- [3] WANG Kun, SHENG Chenxu. Application of GaN in 5G technology[J]. Journal of Physics: Conference Series. Chengdu, China, 2020:1699(1):12004. doi:10.1088/1742-6596/1699/1/012004.
- [4] HAMZA K H, NIRMAL D. A review of GaN HEMT broadband power amplifiers[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2020,116(1):153040. doi:10.1016/j.aeue.2019.153040.
- [5] LIU Bei, BOON C C, MAO Mengda, et al. A 2.4~6 GHz broadband GaN power amplifier for 802.11ax application[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers, 2021,68(6):2404-2417. doi:10.1109/tcsi.2021.3073345.
- [6] JIN Hui, YANG Fei, TAO Hongqi, et al. A Ku-band 100 W high-power amplifier MMIC using 0.2 μm GaN technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2024,34(1):80-83. doi:10.1109/lmwt.2023.3328277.
- [7] JHA J, YADAV Y, UPADHYAY B, et al. High power broad C-band amplifier using AlGaN/GaN based high electron mobility transistors[C]// 2021 the 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering(ICEEE). Antalya, Turkey: IEEE, 2021:36-39. doi:10.1109/iceee52452.2021.9415912.
- [8] 邬佳晟,蔡道民. 2~6 GHz 紧凑型、高效率 GaN MMIC 功率放大器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(8):1054–1058.
   (WU Jiasheng, CAI Daomin. 2~6 GHz compact GaN power amplifier MMICs with high PAE[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(8):1054–1058.) doi:10.11805/TKYDA2023014.
- [9] SONNENBERG T, ROMANO A, VERPLOEGH S, et al. V-and W-band millimeter-wave GaN MMICs[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023,3(1):453-465. doi:10.1109/jmw.2022.3221281.
- [10] ĆWIKLIŃSKI M, BRU CKNER P, LEONE S, et al. First demonstration of G-band broadband GaN power amplifier MMICs operating beyond 200 GHz[C]// 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2020:1117-1120. doi:10.1109/ims30576.2020.9224041.
- [11] CHUNG J W, HOKE W E, CHUMBES E M, et al. AlGaN/GaN HEMT with 300–GHz  $f_{max}$ [J]. IEEE Electron Device Letters, 2010, 31(3):195–197. doi:10.1109/LED.2009.2038935.

太赫兹科字与电士信息字报
--------------

- SHINOHARA K, CORRION A, REGAN D, et al. 220 GHz f<sub>T</sub> and 400 GHz f<sub>max</sub> in 40 nm GaN DH-HEMTs with re-grown ohmic[C]// 2010 International Electron Devices Meeting. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010:1–4. doi:10.1109/iedm.2010.5703448.
- [13] SHINOHARA K,REGAN D,CORRION A,et al. Self-aligned-gate GaN-HEMTs with heavily-doped n+-GaN ohmic contacts to 2DEG[C]// 2021 International Electron Devices Meeting. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2012: 1–4. doi: 10.1109/iedm. 2012.6479113.
- [14] LIEN Y W,PENG Shengwen,LIN Chekai, et al. GaN technologies for applications from L- to Ka-band[C]// IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems. Tel-Aviv, Israel: IEEE, 2017:1-5. doi:10.1109/ COMCAS. 2017.8244831.
- [15] WOOD S M,SHEPPARD S,RADULESCU F,et al. An optical 0.25 µm GaN HEMT technology on 100 mm SiC for RF discrete and foundry MMIC products[C]// The 28th International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. New Orleans,Louisiana,USA:Scopus, 2013:127-130.
- [16] 孔欣,陈勇波,董若岩,等. GaN HEMT栅工艺优化及性能提升[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):318-324. (KONG Xin, CHEN Yongbo, DONG Ruoyan, et al. Performance improvements through gate process optimization for GaN HEMTs[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):318-324.) doi:10.11805/TKYDA2018341.
- [17] NAYAK S,KAO M Y,CHEN Huatang,et al. 0.15 µm GaN MMIC manufacturing technology for 2~50 GHz power applications[C]// The 30th International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. Scottsdale, Arizona, USA: Scopus, 2015:43-46.
- [18] JESSEN G H, FITCH R C, GILLESPIE J K, et al. Short-channel effect limitations on high-frequency operation of AlGaN/GaN HEMTs for T-gate devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007,54(10):2589-2597. doi:10.1109/ted.2007.904476.
- [19] DUBEY S K, ISLAM A. Analysis of AlGaN/GaN based HEMT for millimeter-wave applications[C]// IEEE International Conference of Electron Devices Society Kolkata Chapter(EDKCON). Kolkata, India: IEEE, 2022:547-552. doi:10.1109/edkcon 56221.2022.10032879.
- [20] SONG Bo, SENSALE-RODRIGUEZ B, WANG Ronghua, et al. Effect of fringing capacitances on the RF performance of GaN HEMTs with T-gates[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(3):747-754. doi:10.1109/TED.2014.2299810.
- [21] ZANONI E,SANTI C D,GAO Zhan, et al. Microwave and millimeter-wave GaN HEMTs: impact of epitaxial structure on shortchannel effects, electron trapping, and reliability[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 71(3): 1396–1407. doi: 10.1109/TED.2023.3318564.
- [22] LIU Xinke, WANG Haoyu, CHIU H, et al. Analysis of the back-barrier effect in AlGaN/GaN high electron mobility transistor on free-standing GaN substrates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020,814(1):152293. doi:10.1016/j.jallcom.2019.152293.
- [23] MARGOMENOS A, KURDOGHLIAN A, MICOVIC M, et al. GaN Technology for E, W and G-band applications[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). La Jolla, CA, USA: IEEE, 2014: 1-4. doi: 10.1109/csics.2014. 6978559.
- [24] QIU Rongfu,LU Hai,CHEN Dunjun, et al. Optimization of inductively coupled plasma deep etching of GaN and etching damage analysis[J]. Applied Surface Science, 2011,257(7):2700-2706. doi:10.1016/j.apsusc.2010.10.048.
- [25] NIU Di, WANG Quan, LI Wei, et al. The influence of the different repair methods on the electrical properties of the normally off P-GaN HEMT[J]. Micromachines, 2021,12(2):131. doi:10.3390/mi12020131.

#### 作者简介:

**孔** 欣(1987-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为氮化镓微波功率器件和射频微系统集成技术.email:kx\_hustest@ 163.com.