

专题: 半导体物理与器件

高频大功率氮化镓射频电子器件研究发展综述*

任威宇 常志杰 吕滔 侯斌 武玫 张漾
芦浩 杨凌[†] 马晓华 郝跃

(西安电子科技大学集成电路学部, 宽禁带半导体国家工程研究中心, 西安 710100)

(2025 年 11 月 30 日收到; 2026 年 3 月 23 日收到修改稿)

为满足 5G/6G 通信与先进雷达系统对高频、大功率射频电子器件的迫切需求, 氮化镓 (GaN) 基射频电子器件正经历从横向结构向纵向结构的关键技术演进. 本文系统梳理了 GaN 基射频器件从平面横向拓扑向纵向体运输结构演进的技术脉络. 针对传统高电子迁移率晶体管 (HEMT) 面临的短沟道效应及“耐压-面积”强耦合瓶颈, 探讨了其通过新型宽禁带势垒材料的极化能带工程, 结合 N 极性面与三维栅控 (FinFET) 架构, 优化载流子输运特性的演进路径. 进一步, 深入探讨了基于体材料垂直输运的纵向器件的优势, 着重剖析了 GaN 基异质结双极型晶体管 (HBT) 在大信号线性度方面的潜力, 以及热电子晶体管 (HET) 借助纳米基区准弹道输运机制实现太赫兹频段工作的物理基础. 最后, 面对极高频与极端功率应用场景, 指明了 GaN 射频技术的未来演进轨迹, 并对横纵向器件的互补发展以及系统级异构集成的前沿方向进行深度评述与展望.

关键词: 氮化镓, 高电子迁移率晶体管, 异质结双极型晶体管, 热电子晶体管**DOI:** 10.7498/aps.75.20251631**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251631

1 引言

随着第五代移动通信 (5G) 的全面商用化与第六代移动通信 (6G) 技术预研的启动, 无线通信系统正朝着更高频段、更大数据容量与更低时延的方向飞速演进^[1]. 与此同时, 现代国防系统中的有源相控阵雷达 (AESA) 与电子对抗设备, 也对射频前端模块提出了极高功率密度与严苛可靠性的要求. 上述应用场景的深刻变革, 对核心电子器件提出了更高的工作频率、更高的输出功率以及更优的线性度等复合性要求. 在此趋势下, 传统硅基与砷化镓基器件受限于材料本身的物理极限, 难以兼顾高耐压与高频工作的双重挑战, 已逐渐逼近其性能瓶颈.

作为第三代半导体的典型代表, 氮化镓 (GaN) 以其约 3.4 eV 的宽禁带特性、极高的临界击穿场强和高电子饱和漂移速度, 突破了传统半导体材料的约翰逊品质因数限制, 成为构建下一代高频大功率微波电子器件的理想材料平台^[2,3]. 然而, 材料性能的充分发挥高度依赖于器件的几何拓扑结构. 为最大程度释放 GaN 的材料潜力以应对多样化应用需求, 学术界与产业界在器件结构方面逐步形成了两条并行发展的技术路径: 基于表面异质结输运的横向器件, 以及基于体材料输运的纵向器件. 横向器件以高电子迁移率晶体管 (HEMT) 为代表, 利用 AlGaN/GaN 异质结界面处形成的高密度二维电子气 (2DEG) 作为导电沟道^[4,5]. 该类器件凭借其平面化结构所带来的集成优势, 已在单片微波集

* 国家自然科学基金 (批准号: 62234009, 62474135, 62090014, 62404165, 62404175)、中央高校基本科研业务费 (批准号: QTZX25069)、中国国家博士后创新人才支持计划 (批准号: BX20200262)、中国博士后科学基金 (批准号: GZC20232022, 2021M692499, 2023M732730, 2024M752517) 和陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2024C-YBQN-0611) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yangling@xidian.edu.cn

成电路 (MMIC) 中占据主导地位, 并借助新型势垒材料与三维栅极结构持续拓展其在频率与效率方面的性能边界. 相较之下, 纵向器件则依赖垂直方向上的体材料漂移层实现电流运输与耐压支撑. 该类结构在物理上实现了击穿电压与芯片面积的解耦^[6], 并通过埋层体运输机制有效规避表面态散射, 进而在高功率密度、大信号线性度, 以及基于准弹道运输的太赫兹频段应用等方面展现出独特潜力^[7,8].

本文旨在从物理机制、结构创新与性能瓶颈 3 个维度系统梳理 GaN 基电子器件的发展现状. 首先, 将探讨横向 GaN HEMT 中 2DEG 的输运特性及其在毫米波频段材料与结构演进; 进而深入分析纵向器件如何利用体运输机制突破耐压与线性度方面的关键问题, 重点评述异质结双极型晶体管与热电子晶体管的研究进展; 最后, 结合两类器件结构的局限性与互补性, 展望 GaN 电子技术在异构集成与极限性能突破方面的未来发展方向.

2 基于异质结的横向器件

2.1 2DEG 的物理输运机制

在横向 GaN 基 HEMT 器件中, 异质结界面处形成的二维电子气是实现卓越射频与功率特性的物理核心. 该高导电沟道的形成机制与传统硅基 MOSFET 存在本质区别: 其不依赖化学掺杂, 而是源于 III 族氮化物纤锌矿晶体结构所固有的强极化效应. 具体而言, AlGaIn 势垒层与 GaN 沟道层之间的自发极化差异, 以及晶格失配引入的压电极化, 共同在异质界面处产生极强的内建电场, 导致能带剧烈弯曲并形成三角形势阱, 从而在不引入外部掺杂的情况下即可积聚面密度高达 10^{13} cm^{-2} 量级的电子^[4,5]. 由于电子被约束于纳米尺度的三角势阱中运动, 且沟道层通常为非故意掺杂, 导电电子在空间上与电离施主杂质有效分离, 如图 1 所示. 这种分离机制显著抑制了电离杂质散射, 使 2DEG 在室温下仍能维持高于 $2000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的电子迁移率. 相比之下, 体材料中的电子因频繁受杂质散射作用, 迁移率通常较低. 高迁移率特性与 GaN 材料本身约 $2.5 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 的高电子饱和速度相结合, 共同保障了器件在高频工作条件下的低损耗性能^[2]. 此外, 2DEG 特性具备高度可控性. 通过调整势垒层材料 (如采用 InAlN 替代 AlGaIn)

或改变 Al 组分与厚度, 可精确调控界面极化电荷密度. 这种能带工程为 HEMT 结构设计提供了在不显著损失电子迁移率的前提下进一步提升电流驱动能力的自由度. 同时, GaN 材料约 3.4 eV 的宽禁带特性, 有效抑制了高温高压环境下的本征载流子激发, 从而保障了 2DEG 沟道的良好关断特性与低漏电性能^[3,9].

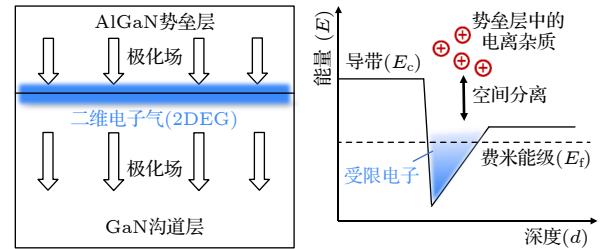


图 1 AlGaIn/GaN 异质结及极化效应与垂直方向能带结构
Fig. 1. AlGaIn/GaN heterojunction and polarization effects with vertical energy band structure.

综上所述, III-N 异质结中 2DEG 的优势源于其极化诱导形成机制与低散射输运特性. 高迁移率与可通过能带工程调控的高载流子密度, 共同奠定了 GaN HEMT 在下一代高频、高功率放大器中的核心地位. 随着超宽禁带势垒材料的引入与异质结界面的持续优化, 2DEG 的输运极限有望进一步突破, 为太赫兹通信与量子计算等前沿领域提供关键物理平台.

2.2 AlGaIn/GaN HEMT 器件及功率特性

基于上述 2DEG 卓越的电学输运特性, AlGaIn/GaN 异质结 HEMT 成为了将这一量子效应转化为工程应用的主要方式. 其核心运作机理在于直接利用极化效应诱导的高密度 2DEG 作为导电沟道, 赋予了器件本征的常开特性. 在工作模式下, 漏源电压驱动载流子漂移, 而栅极通过静电场效应调制势阱深度以控制电流. 相较于硅基器件, GaN HEMT 凭借宽禁带带来的高临界击穿场强和高饱和电子速度, 打破了传统半导体的约翰逊优值限制.

近年来, 随着纳米制造工艺的进步, AlGaIn/GaN HEMT 在高频与高功率特性上不断刷新纪录. 为了突破频率极限, 栅长 (L_g) 的微缩与寄生参数的最小化成为核心路径. 早在 2015 年, Tang 等^[10] 通过将栅极长度极限微缩至 20 nm , 如图 2(a) 所示, 在纯 AlGaIn/GaN HEMT 中创下了截止频率 454 GHz 与最大振荡频率 444 GHz 的世界纪录.

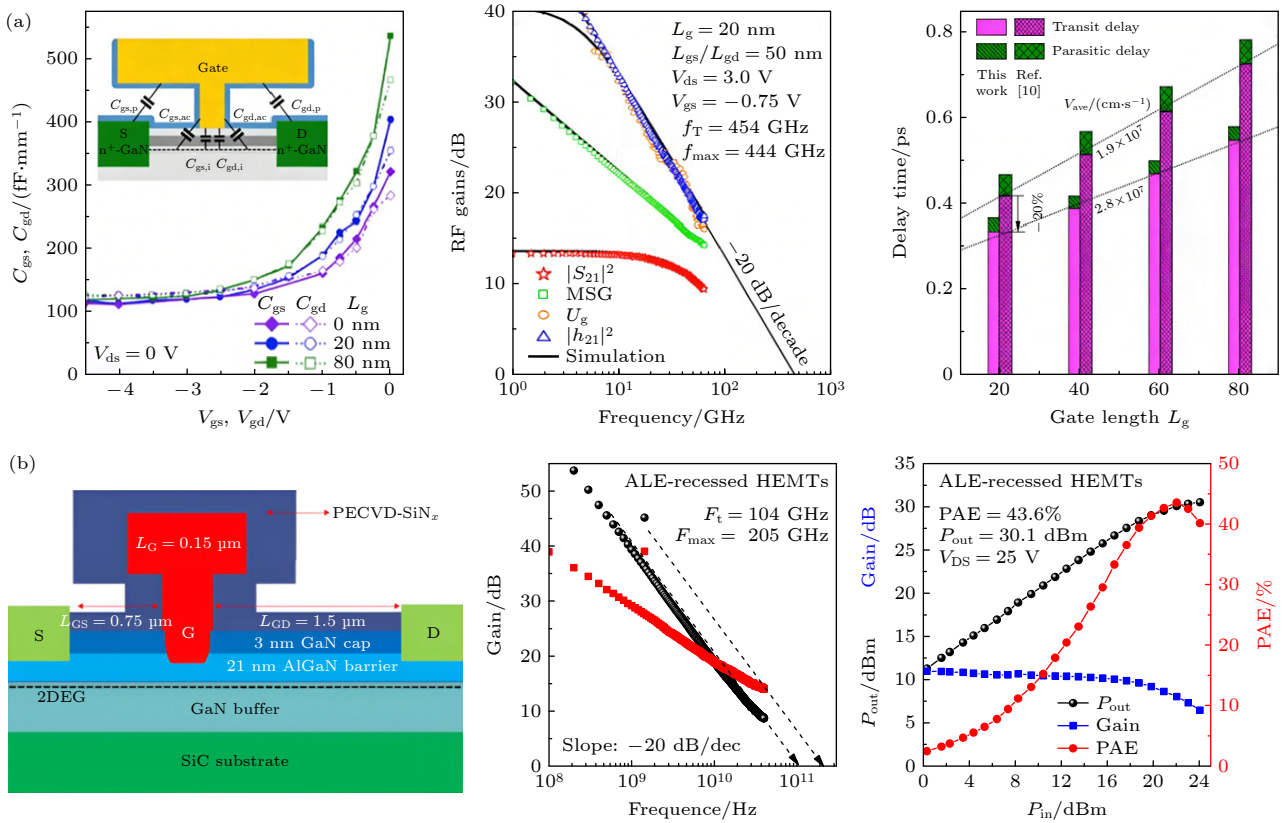


图 2 (a) 20 nm 栅长 HEMT 器件结构图及小信号特性, 传输延迟随栅长变化关系图^[10]; (b) 凹槽栅 HEMT 器件结构和该器件的小信号大信号特性^[11]
 Fig. 2. (a) Schematic of 20 nm gate-length HEMT device structure and small-signal characteristics; graph of transmission delay versus gate length^[10]; (b) structure of a recessed-gate HEMT device and the device's small- and large-signal characteristics^[11].

在输出功率方面, 如何在更高的毫米波频段下维持高能效高输出功率是当前的研究热点. Zhang 等^[11]开发了一种基于原子层刻蚀 (ALE) 的凹槽栅制造技术, 如图 2(b) 所示, 制备的 0.15 μm 栅长 AlGaIn/GaN HEMT 在 40 GHz 的高频测试中表现卓越, 不仅实现了 4.1 W/mm 的饱和输出功率密度, 更关键的是达到了 43.6% 的高功率附加效率 (PAE). 这一成果显著提升了 GaN 器件在 Q 波段的能效水平, 对于提升未来 5G 毫米波基站及卫星通信系统的能效比具有重要意义.

相较于传统硅基器件, AlGaIn/GaN HEMT 突破了材料物理极限, 其比导通电阻理论值降低了 3 个数量级, 同时具备极快的开关瞬态响应, 显著降低了能源转换损耗. 得益于超过 2000 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的电子迁移率, 器件展现出优异的频率特性, 成为支撑 5G 毫米波通信前端与先进雷达系统实现高频、高线性度运行的关键器件技术^[2,3].

如图 3 所示, 传统横向 GaN HEMT 的高频性能演进与栅极长度的微缩呈现出显著的对对应关系.

随着各大顶尖研究机构不断挑战工艺极限, 器件的特征栅长由 120 nm 逐步下探至极端的 20 nm, 其最大振荡频率也相应地从不足 200 GHz 实现了向 400 GHz 以上的显著跃升. 这一发展轨迹直观地表明, 物理尺寸的按比例微缩是推动传统器件频率突破的核心驱动力; 但同时, 当栅长逼近 20 nm 节点时, 这种单纯依赖微缩的平面架构也正逐渐触及提升高频性能的物理天花板.

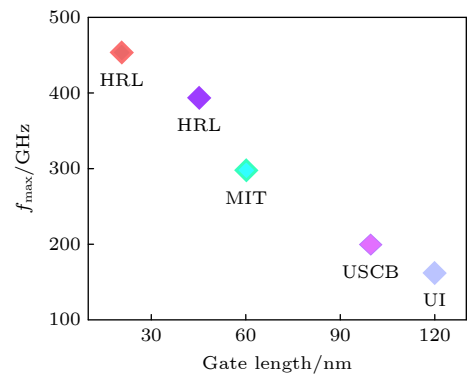


图 3 AlGaIn/GaN 栅长与频率变化趋势
 Fig. 3. Trend of AlGaIn/GaN gate length with frequency.

2.3 新型异质结材料体系与器件

2.3.1 InGaN 沟道: 载流子限域性增强与双异质结设计

相较于传统 GaN 沟道器件, InGaN 沟道 HEMT 的设计理念旨在利用窄禁带材料的特性, 从能带结构层面重构载流子的输运环境. 其核心创新在于 InGaN 材料较小的有效质量和较窄的禁带宽度, 当将其作为沟道层引入时, 可在异质界面处诱导产生更大的导带偏移. 这种深势阱效应不仅显著增强了对二维电子气的量子限域能力, 更重要的是, 其与底部宽禁带 GaN 缓冲层共同构成天然背势垒, 从而形成双异质结结构. 该结构能有效抑制短沟道效应与电流崩塌现象, 并显著提高 2DEG 的面密度, 具备更优的载流子限域特性与更高的载流子迁移率. 在早期的工作中已经验证了该架构在抑制电流崩塌与提升微波功率方面的物理潜力. 然而 InGaN 异质结往往受限于严重的合金无序散射与界面晶格应力, 导致器件在大信号工作下的跨导非线性极为显著, 且关态漏电流难以控制, 这成为制约其在现代通信系统中应用的核心痛点.

近年来, 随着外延生长工艺与器件物理的深度融合, 研究者将技术路线全面转向精细化的复合沟道设计与极化能带工程. 为了克服界面粗糙度散射, 一种带有渐变 InGaN 副沟道的创新型 AlGaIn/GaN HEMT 架构被提出^[12], 如图 4(a), (b) 所示. 该设计通过精细调控 In 组分的空间梯度, 利用极化电荷重塑了量子阱内的能带分布, 使 2DEG 在垂直方向上形成了更宽且均匀的浓度分布, 从而极大延缓了跨导随栅压变化的衰减速度, 赋予了器件宽广的跨导平坦区.

在功率特性方面, 针对毫米波频段的高功率应用需求, Lu 等^[13] 利用槽栅氧化技术, 如图 4(c), (d) 所示, 在 SiC 衬底上成功制备了高性能 InGaN 沟道器件. 该器件 (源漏间距 2 μm) 不仅实现了 76 V 的高击穿电压, 且在严苛的关态高场应力下, 其饱和电流崩塌比仅为 11.5%, 展现出优异的动态稳定性. 大信号测试结果表明, 该器件在 30 GHz 频率下实现了高达 9.6 W/mm 的输出功率密度, 以及 42.3% 的功率附加效率, 充分验证了 InGaN 沟道技术在高能效毫米波功率放大器领域的应用前景.

目前, 基于 InGaN 沟道的器件结构持续创新, 例如开发双沟道结构以提升高温工作性能^[14], 如图 4(e) 所示; 采用 N 面复合沟道在超薄沟道中实

现迁移率倍增^[15], 如图 4(f) 所示; 以及引入超晶格背势垒以优化电场分布并提高击穿电压. 这些新型结构充分发挥了 InGaN 沟道在载流子限域、散射抑制和垂直尺度微缩方面的独特优势. 展望未来, 随着异质外延质量的进一步提高, 以及对物理机制的深入理解和工艺的持续优化, InGaN 沟道 HEMT 有望在高功率放大、高功率输出及高速开关等领域展现出更强的竞争力, 成为氮化物电子器件发展的重要方向之一.

2.3.2 InAlN 势垒: 晶格匹配与极化强度的协同优化

在大功率射频器件中, 为获得高电流密度, 通常采用提高 AlGaIn 势垒层中 Al 组分的策略, 以增强极化效应, 进而提升二维电子气 2DEG 的面密度. 然而, 随着 Al 组分的增加, 尽管极化效应增强、载流子浓度上升, 但由此引发的晶格失配也会导致张应变显著加剧^[16]. 当势垒层厚度超过临界值时, 应变诱发的位错弛豫与逆压电效应将严重劣化界面质量, 增加载流子散射中心, 最终导致迁移率下降^[17].

为从根本上解决势垒层应变引发的可靠性问题, 并进一步提升器件性能, InAlN 合金被视为替代 AlGaIn 的理想势垒材料. 其核心优势在于独特的晶格匹配特性, 当 In 组分调节至约 17% 时, InAlN 合金的面内晶格常数与 GaN 完美匹配. 这种晶格匹配状态意味着势垒层在生长过程中处于无应力模式, 从物理根源上消除应变弛豫的风险, 并彻底规避了高电场下逆压电效应引发的缺陷增殖问题^[18].

在 InAlN 势垒 HEMT 器件性能优化方面, 多项研究通过不同技术路径在频率特性、击穿电压及功率效率等方面取得了显著进展. 例如, 早在 2014 年, Downey 等^[19] 基于 SiC 衬底, 采用 $\text{SiN}_x/\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ MIS-HEMT 结构, 如图 5(a) 所示, 在实现 95 V 三端击穿电压的同时, 获得了 114 GHz/230 GHz 的电流增益截止频率 (f_T/f_{max}), 并在 40 GHz 负载拉力测试中表现出 37.5% 的功率附加效率 (PAE)、1.25 W/mm 的输出功率和 9.7 dB 的增益. 近年来, 结构设计与工艺创新持续推动器件性能突破. 2024 年, An 等^[20] 提出多阈值耦合 InAlN/GaN 直流 HEMT (MC-DC HEMT), 如图 5(b) 所示, 该结构具备 7.8 V 的栅压摆幅和 216.3 mS/mm 的最大跨导, 其 f_T 与 f_{max} 在宽栅压范围内稳定维持在 34—72 GHz, 线性性能亦显著提升, OIP3 达

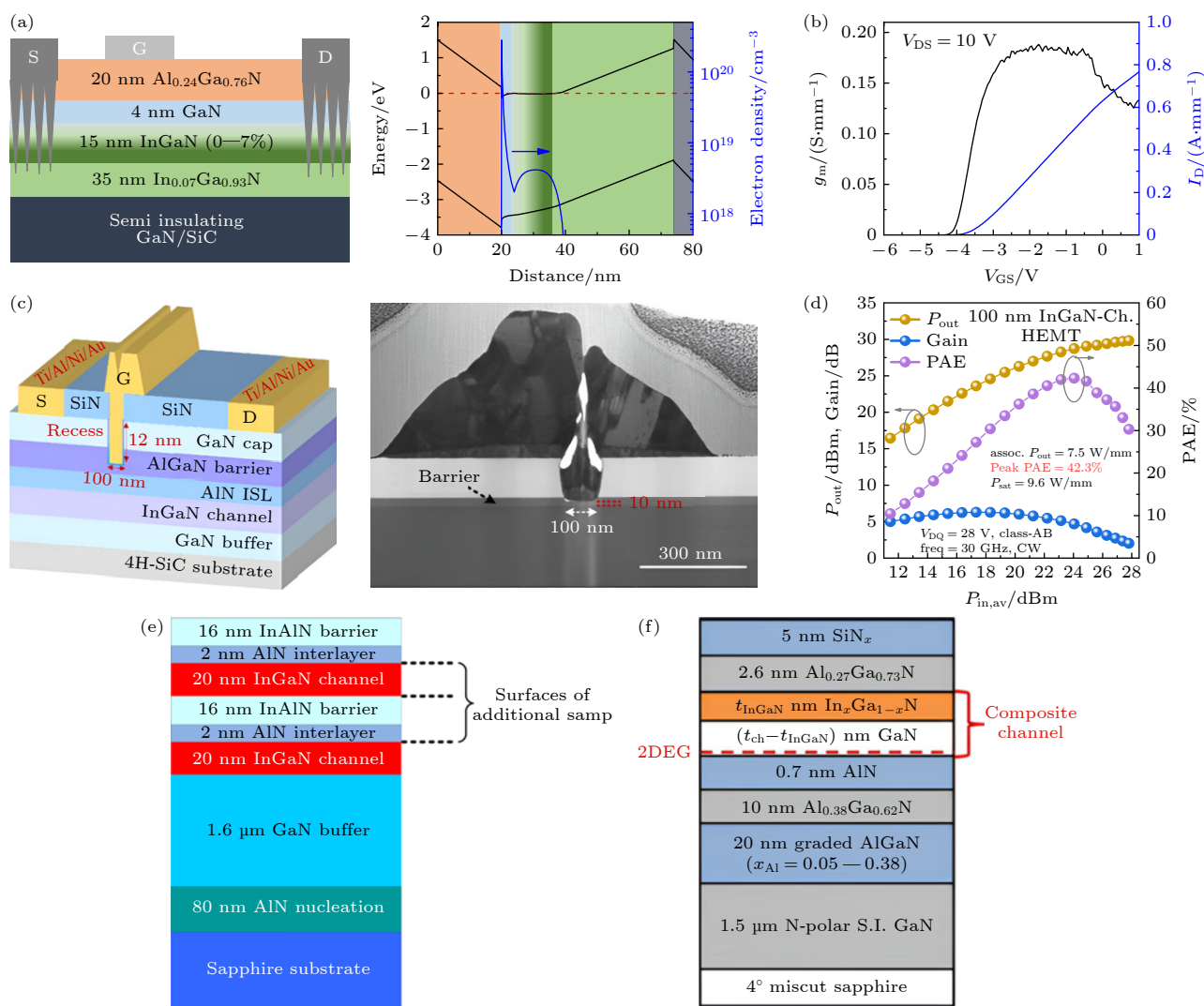


图 4 (a) 具有渐变 InGaIn 副沟道的创新型 AlGaIn/GaN HEMT 结构; (b) 该结构的转移特性曲线^[12]; (c) 基于栅槽氧化技术的高性能 InGaIn 沟道器件及栅极部分 SEM 图^[13]; (d) 该结构的大信号特性^[13]; (e) InGaIn 双沟道外延结构^[14]; (f) N 面复合超薄 InGaIn 沟道外延结构^[15]

Fig. 4. (a) Innovative AlGaIn/GaN HEMT structure with a graded InGaIn sub-channel; (b) transfer characteristic curve of this structure^[12]; (c) high-performance InGaIn channel device based on trench-gate oxide technology and SEM image of the gate part^[13]; (d) large-signal characteristics of this structure^[13]; (e) InGaIn double-channel epitaxial structure^[14]; (f) N-face composite ultrathin InGaIn channel epitaxial structure^[15].

到 38 dBm, 较参考器件提高了 10 dBm. 同年, Zhou 等^[21] 采用栅下凹槽氧化工艺 (RAO), 如图 5(c) 所示, 有效调控栅下电场并抑制射频色散, 从而改善器件的功率表现. RAO-HEMT 在 3.6 GHz 频率下, 在 6 V 和 9 V 漏极电压时分别实现了 71% 与 74% 的高 PAE, 展现出优异的低压效率潜力.

2.3.3 ScAlN 势垒: 铁电极化效应与超高面密度 2DEG

早期的 ScAlN 器件受限于材料外延质量与工艺成熟度, 普遍面临栅泄漏电流大、开关比低及欧姆接触困难等问题, 严重制约了其可靠性与应用推

广. 近年来, 随着外延生长技术的进步以及器件结构设计的创新, ScAlN/GaN HEMT 在频率、功率及击穿特性上均取得了显著突破, 逐步实现了高性能与高可靠性的统一.

在材料生长与器件基础性能方面, MBE 技术率先取得进展. 2019 年, Kazior 等^[22] 利用 MBE 技术在 SiC 衬底上成功生长了 ScAlN/GaN 异质结. 得益于 ScAlN 极强的自发极化效应, 该异质结界面诱导出了超高浓度的二维电子气 ($>3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), 如图 6(a) 所示, 载流子密度随势垒层厚度的变化关系. 该器件实现了超过 3 A/mm 的饱和输出电流密度及大于 60 V 的击穿电压, 且在 30 GHz 下

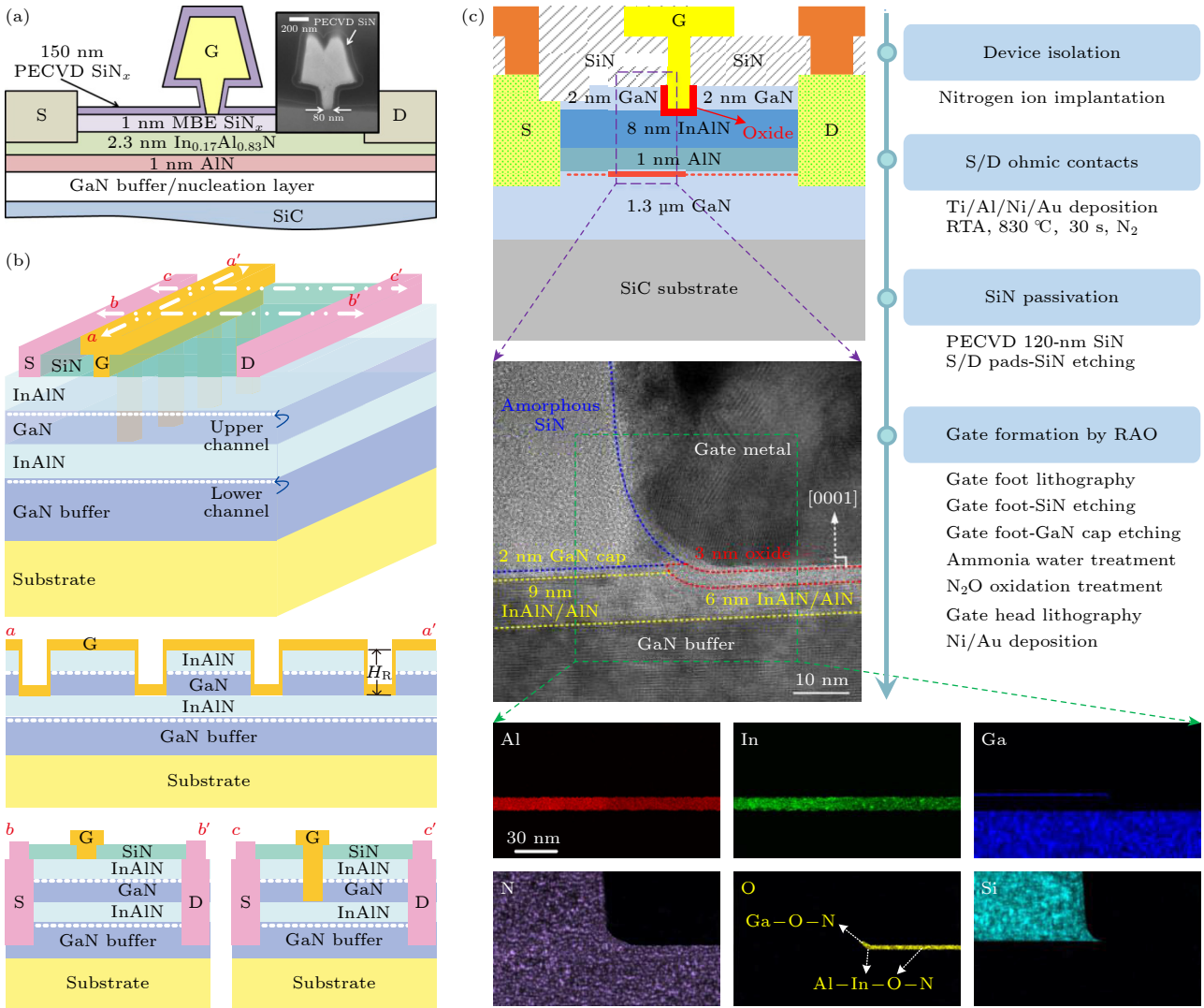


图 5 (a) $\text{SiN}_x/\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ MIS-HEMT 结构^[19]; (b) 多阈值耦合 InAlN/GaN 直流 HEMT 结构^[20]; (c) 采用栅下凹槽氧化工艺 HEMT 器件及 TEM 图^[21]

Fig. 5. (a) $\text{SiN}_x/\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ MIS-HEMT structure^[19]; (b) multi-threshold coupled InAlN/GaN DC HEMT structure^[20]; (c) HEMT device with gate recess oxidation process and TEM image^[21].

展现出超过 13 dB 的小信号增益, 验证了 ScAlN 材料在高频高功率领域的潜力. 同年, Green 等^[23] 针对 ScAlN 宽带隙导致的接触难题, 创新性地采用 n^+ GaN 选择性区域再生长 (SAG) 工艺, 如图 6(e) 所示, 有效降低了欧姆接触电阻. 该器件不仅展现出 2.4 A/mm 的高电流密度与 0.67 S/mm 的高跨导, 其 110—180 nm 栅长器件的截止频率与最高振荡频率分别达到了 88 GHz 和 91 GHz, 为射频应用奠定了工艺基础.

为了进一步抑制短沟道效应并提升毫米波功率特性, Green 等^[24] 随后引入了 ScAlGaIn 四元合金势垒, 如图 6(b) 所示. 这种新型四元异质结结构有效改善了栅控能力, 制备的器件实现了 $f_T/f_{\max} = 72/102$ GHz 的优异频率特性. 在 Ka 波

段 (30 GHz) 的大信号测试中, 该器件在 20 V 漏偏压下输出了 5.77 W/mm 的功率密度, 并在 15 V 下实现了 47.0% 的功率附加效率 (PAE), 展示了 ScAlGaIn 在毫米波频段的能效优势. 针对极高化电荷密度带来的峰值电场集中与早击穿问题, 场板与介质工程成为关键解决方案. Cheng 等^[25] 于 2021 年提出了一种采用高介电常数 $\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_1\text{Nb}_{1.5}\text{O}_7$ (BZN) 作为钝化层的新型 MISH-HEMT 结构, 如图 6(c) 所示. BZN 层有效调制了栅漏区域的电场分布, 将器件平均击穿电压从 68.9 V 大幅提升至 121.5 V, 同时保持了 59/69 GHz 的 f_T/f_{\max} . 这一工作证明了高 k 介质钝化是解决超高面密度 ScAlN 器件高电流-高耐压矛盾的有效途径.

随着技术的成熟, 更具量产前景的 MOCVD

生长 ScAlN 器件也开始出现. 2023 年, Krause 等^[26]报道了基于 MOCVD 生长的高质量 AlScN/GaN HEMT, 如图 6(d) 所示. 相比于传统 AlGaIn 器件, 该器件在同等偏置下截止频率提升了 7 GHz (达到 52 GHz), 并在 40 GHz 下保持了 10 dB 的最大稳定增益 (MSG). 在大信号性能方面, 该器件在 30 V 高压偏置下实现了 8.4 W/mm 的功率密度与 46.1% 的 PAE, 标志着 ScAlN 技术向工业化量产迈出了坚实的一步.

横向 GaN HEMT 势垒材料的演进, 其核心技术主线始终围绕极化强度和晶格匹配, 如表 1 所示, 系统对比了 3 种主流宽禁带势垒材料体系的关键物理参数及其在器件工程中的优劣势.

2.3.4 N 极性 GaN HEMT: 反向极化场与短沟道效应抑制

在 III-N 族半导体的极性工程中, N 极性 (000 $\bar{1}$) GaN 器件凭借其独特的反向极化场特性, 正逐渐

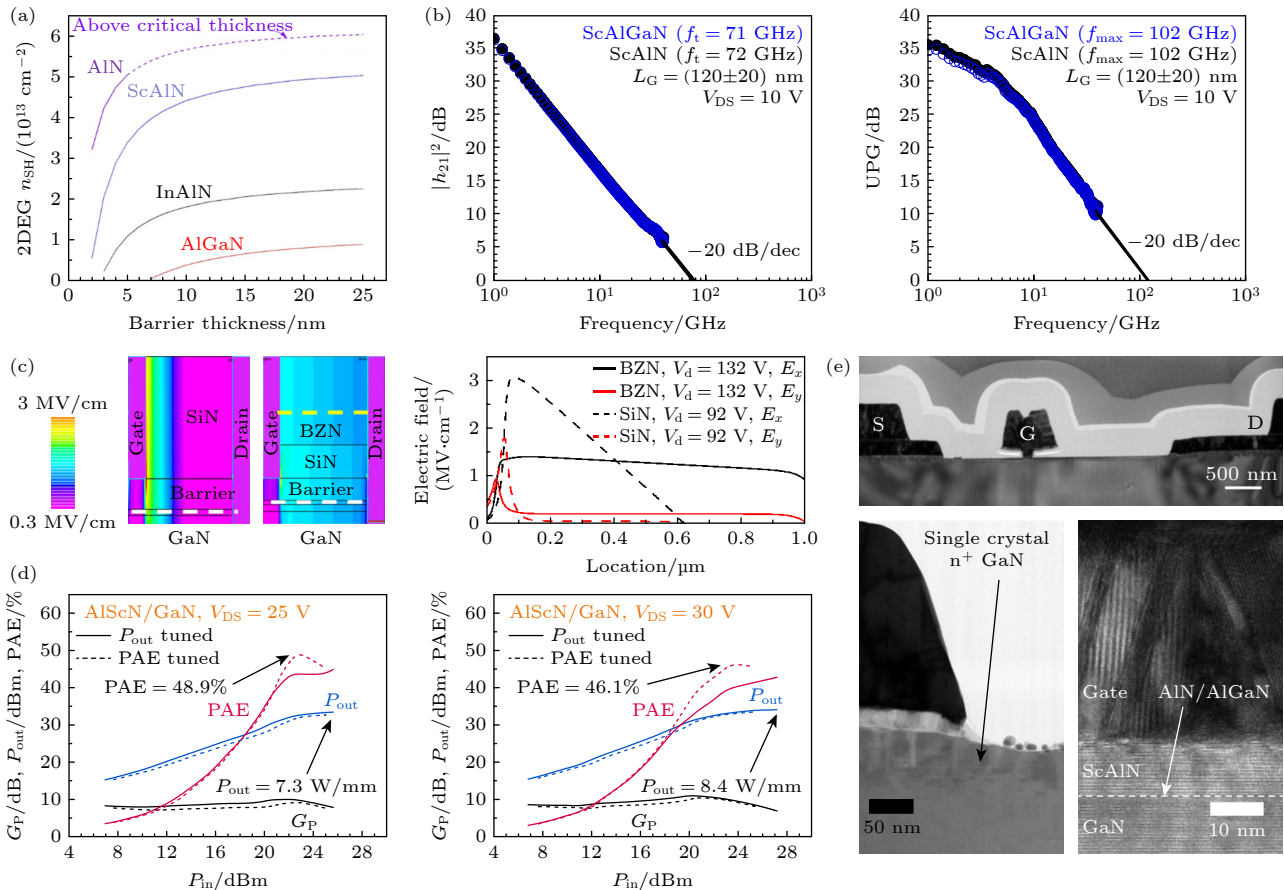


图 6 (a) 载流子密度随势垒层厚度的变化关系^[22]; (b) 具有 ScAlGaIn 四元合金势垒的 HEMT 器件的小信号特性^[24]; (c) TCAD 仿真对比: 不同偏置条件下, BZN 钝化与常规钝化器件的栅漏间电场分布^[25]; (d) 基于 MOCVD 生长的高质量 AlScN/GaN HEMT 器件的大信号特性^[26]; (e) 采用 n⁺ GaN 选择性区域再生长工艺的器件截面 TEM 形貌图^[23]

Fig. 6. (a) Carrier density as a function of barrier thickness^[22]; (b) small-signal characteristics of HEMTs with a ScAlGaIn quaternary alloy barrier^[24]; (c) TCAD simulations comparing the gate-drain electric field distributions under different bias conditions for BZN and conventional passivations^[25]; (d) large-signal characteristics of high-quality AlScN/GaN HEMTs grown by MOCVD^[26]; (e) cross-sectional TEM image showing the device morphology utilizing the n⁺ GaN selective area regrowth process^[23].

表 1 3 种宽禁带势垒材料 GaN HEMT 势垒材料体系的物理特性与技术对比

Table 1. Physical characteristics and technical comparison of three wide-bandgap barrier materials in GaN HEMT barrier material systems.

势垒材料	极化电荷密度/cm ⁻²	面内晶格常数 <i>a</i>	与GaN的应力状态	核心优势	关键工艺挑战
AlGaIn	~1×10 ¹³	3.112—3.189	张应变	高工艺成熟度	高Al组分引发应变弛豫
InAlN(In~17%)	~2×10 ¹³	3.1889	无应变	高可靠性	外延极难易发生相分离
ScAlN	>3×10 ¹³	3.112—3.250	严重张应变	高2DEG密度	Sc原子氧化和栅漏电

成为突破高频器件性能瓶颈的关键技术. 与传统的 Ga 极性器件不同, N 极性 HEMT 通常采用倒置型异质结拓扑, 即 AlGa_xN 背势垒位于 GaN 沟道下方^[27]. 这种结构反转在物理机制上带来了显著优势: 首先, 底部的 AlGa_xN 层形成了天然的背势垒, 显著增强了对电子的垂直限域能力, 在短沟道器件中能更有效地抑制短沟道效应^[28]; 其次, 源漏金属直

接与窄带隙的 GaN 沟道层接触, 不仅大幅降低了欧姆接触电阻, 还有利于优化超高频下的寄生参数^[29]; 此外, N 极性表面较小的能带弯曲理论上可降低肖特基势垒高度, 而利用反向极化场耗尽沟道, 也为实现无槽栅损伤的增强型器件提供了新思路^[30].

近年来, 随着外延生长与制造工艺的不断革新, N 极性 HEMT 在 W 波段 (94 GHz) 的功率与

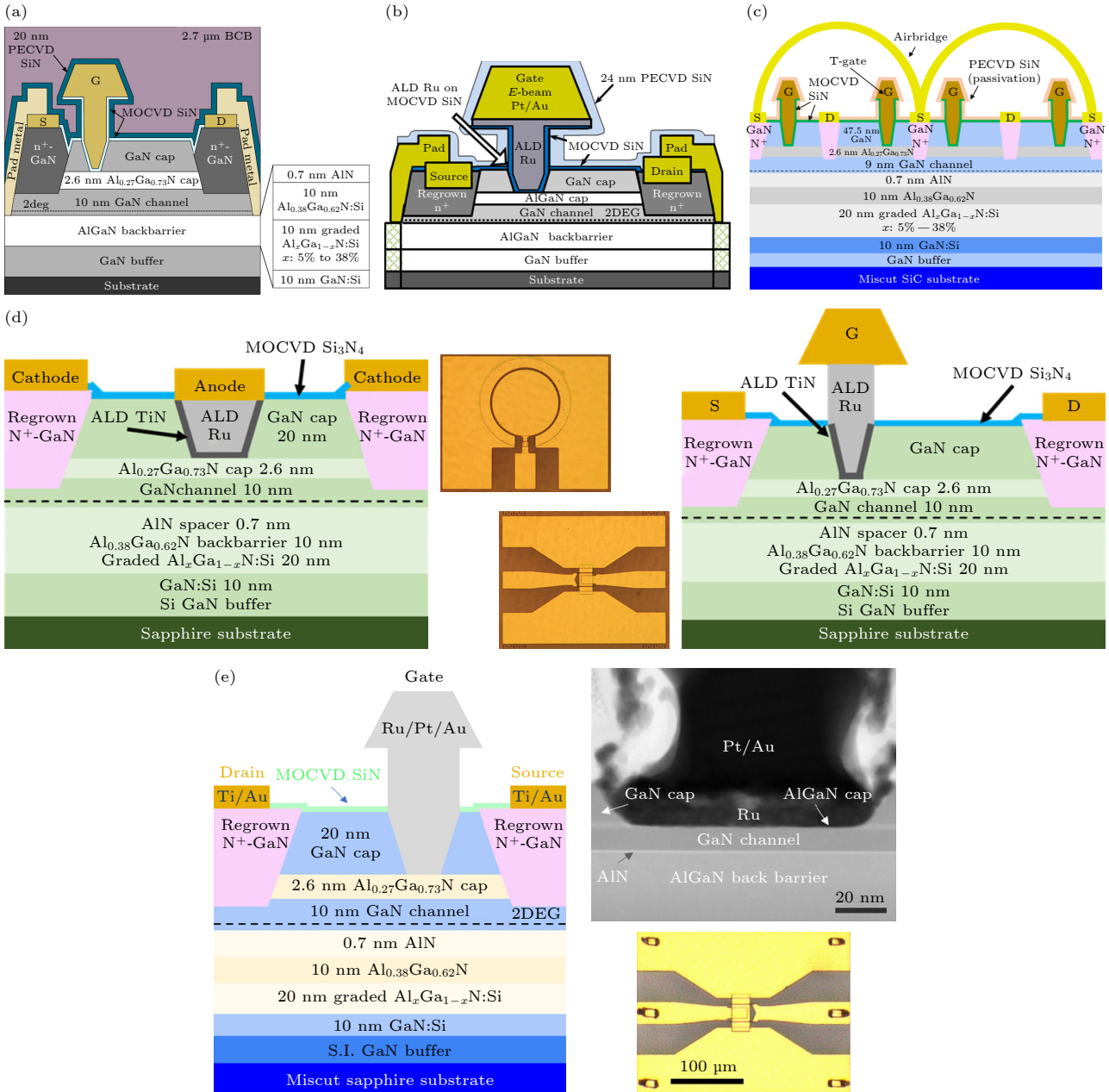


图 7 (a) 采用凹槽栅结构并在 Access 区域引入 SiN 钝化层^[31]; (b) 采用原子层沉积 Ru 栅金属填充狭窄的 T 型栅脚^[32]; (c) 基于空气桥技术的四指并联 (4 × 25 μm) N 极性 HEMT 器件^[33]; (d) 采用 TiN/Ru 叠层金属作为深凹槽栅肖特基接触层的器件结构^[34]; (e) Aksoy 等^[35]提出的通过缩小栅极至 2DEG 垂直距离并优化肖特基势垒的结构

Fig. 7. (a) Device structure featuring a recessed gate with a PECVD SiN passivation layer introduced in the access region^[31]; (b) narrow T-gate stem filling utilizing an ALD Ru gate metallization process^[32]; (c) four-finger (4 × 25 μm) N-polar HEMT based on air-bridge technology^[33]; (d) device structure utilizing a TiN/Ru metal stack as the Schottky contact layer for a deeply recessed gate^[34]; (e) structure proposed by Aksoy et al. ^[35] reducing the vertical gate-to-2DEG distance and optimizing the Schottky barrier.

效率特性屡创新高. 2020 年, Romanczyk 等^[31] 针对 N 面器件的射频色散问题, 通过优化凹槽栅深度并在 Access 区域引入 PECVD SiN 钝化层, 如图 7(a) 所示, 显著改善了界面态控制. 该器件在 94 GHz 的大信号测试中 ($V_{DS} = 16$ V), 实现了 5.5 W/mm 的最大输出功率密度与 20.6% 的功率附加效率 (PAE), 初步验证了 N 极性结构在毫米波频段的潜力. 为了进一步挖掘器件频率极限, Liu 等^[32] 于 2021 年引入了新型原子层沉积 Ru 栅金属化工艺, 如图 7(b) 所示. 该工艺有效填充了狭窄的 T 型栅脚, 在实现 48 nm 极短栅长的同时大幅降低了栅极电阻. 受益于此, 器件展现出 $f_T/f_{max} = 112/260$ GHz 的优异小信号特性, 并在 67 GHz 下保持了 10.7 dB 的最大稳定增益. 在 94 GHz 的大信号测试中, 器件性能显著提升至 $P_{out} = 6.2$ W/mm 与 PAE = 33.8% ($V_{DS} = 18$ V). 随着单管性能的提升, 大功率多指器件的实用化成为研究热点. 2023 年, Aksoy 等^[33] 利用空气桥互连技术, 成功研制了四指并联 (4×25 μ m) 的 N 极性 HEMT, 如图 7(c) 所示. 测试结果表明, 该器件在大规模集成下并未出现明显的热退化或增益压缩, 在 94 GHz 下依然保持了 7.1 W/mm 的高功率密度与 31.7% 的 PAE, 证明了 N 极性技术在高功率合成应用中的可靠性.

最新的研究进一步聚焦于栅极肖特基接触的优化. 2024 年, Collins 等^[34] 采用 TiN/Ru 叠层金属作为深凹栅的肖特基接触层, 如图 7(d) 所示. 相比纯 Ru 栅, TiN 的引入将反向栅漏电降低了 6 倍, 并显著改善了击穿电压. 该器件实现了 $f_T/f_{max} =$

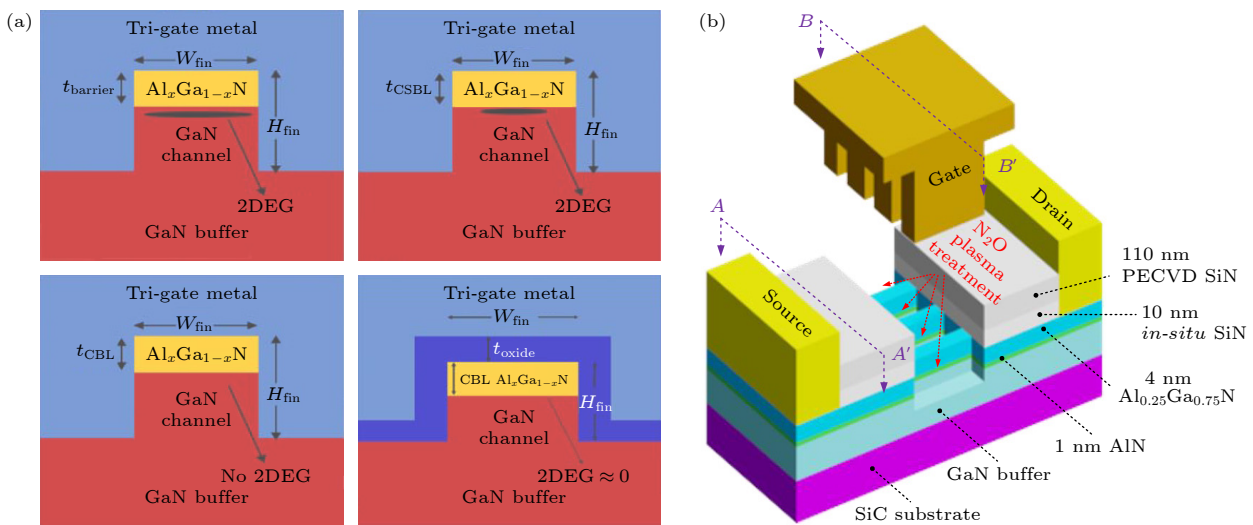
193/362 GHz 的超高频特性; 在 94 GHz 下 ($V_{DS} = 12$ V), 其 PAE 跃升至 53.4%, 线性增益达到 10.2 dB. 同年, Aksoy 等^[35] 通过进一步缩小 2DEG 到栅极的垂直距离并优化肖特基势垒, 如图 7(e) 所示, 制备的器件在保持低漏电的同时, 实现了 50.2% 的峰值 PAE 及 10.5 dB 的高增益, 再次刷新了 N 极性器件在高频能效方面的记录.

综上, N 极性 GaN HEMT 并非简单的结构翻转, 而是通过反向极化场解决短沟道效应与接触电阻瓶颈的关键技术. 随着栅极工艺的精细化与金属化方案的成熟, N 极性器件在 W 波段乃至太赫兹频段的高效功率放大应用中展现出不可替代的优势.

2.3.5 从平面到三维: 纳米沟道与 FinFET 架构

随着 GaN HEMT 器件向更高频率与集成度迈进, 器件的尺寸缩放, 尤其是栅长的缩短将作为主要途径. 但是传统的平面结构在按比例缩小后, 会遭遇严重的短沟道效应, 如阈值电压漂移和栅控能力显著下降. 为了突破这一瓶颈, 器件架构从平面结构向三维立体结构发展, 即引入纳米沟道与鳍式场效应晶体管 (FinFET), 为解决栅极静电控制提供了关键思路.

基于三维栅静电控制原理, 结合超薄势垒层设计, Chakrabarty 与 Zhou 等^[36,37] 分别通过临界势垒厚度控制及等离子体氧化侧壁工艺, 如图 8 所示, 实现了阈值电压稳定在 +0.3—+0.5 V 的高性能增强型 (E-mode) 器件, 在毫米波频段展现出高达 55% 的功率附加效率 (PAE), 证明了三维栅在维持高频性能的同时实现常关操作的巨大潜力.



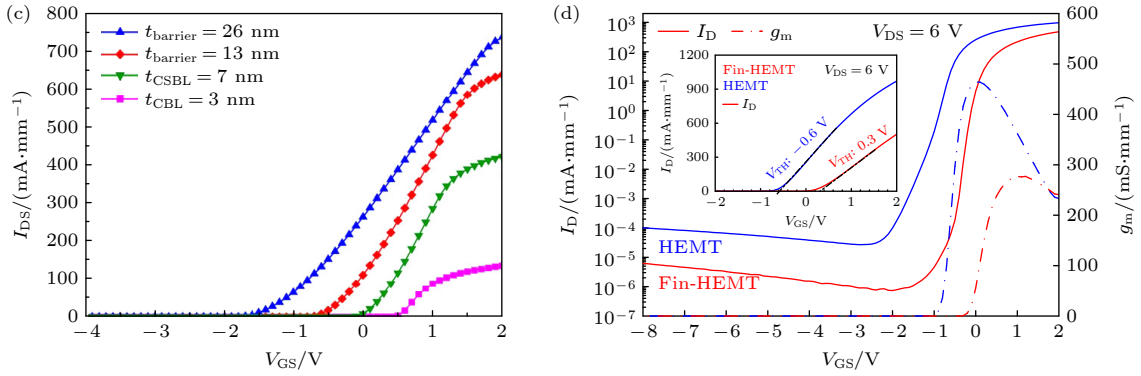
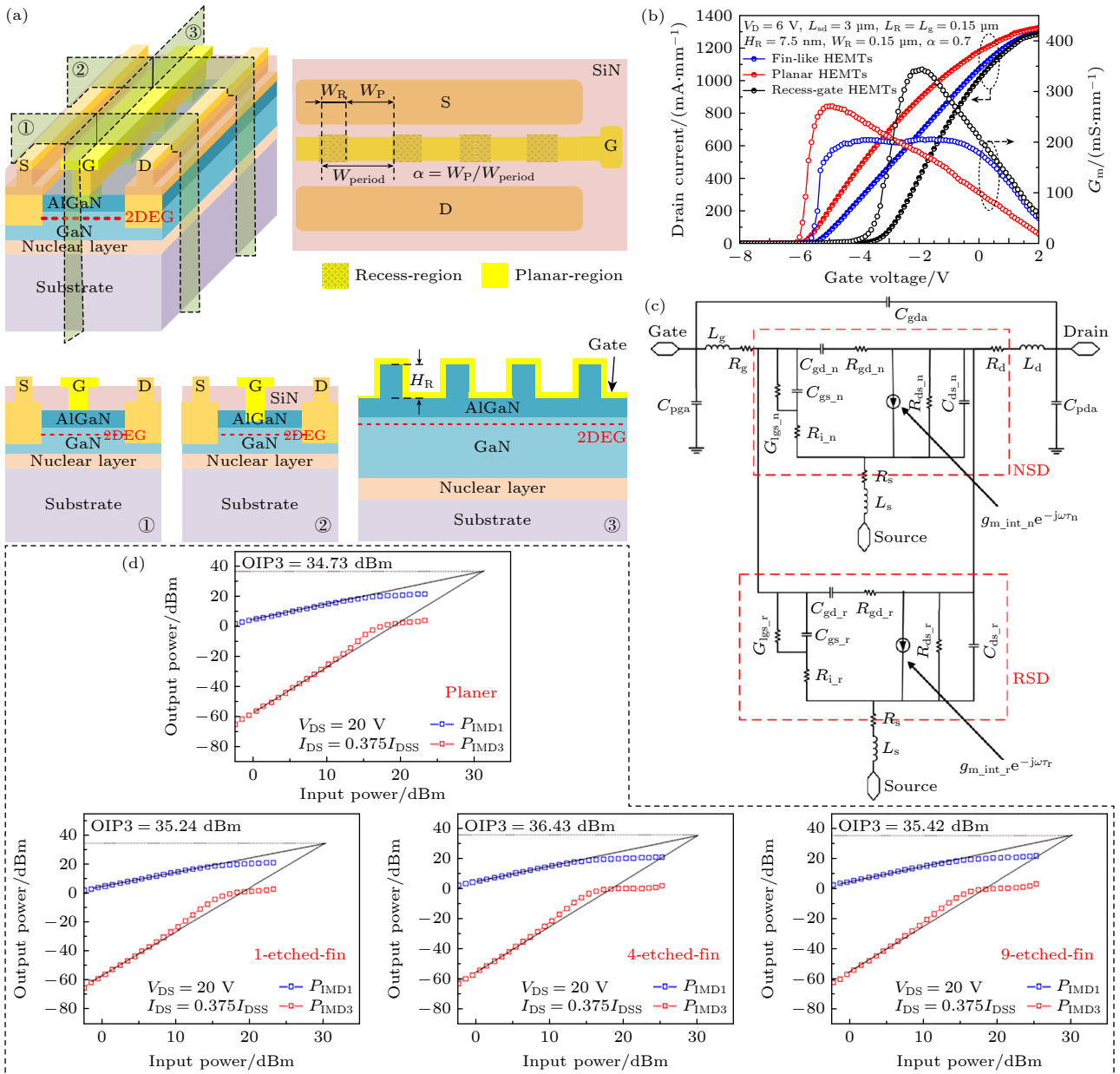


图 8 (a) 三维栅结构示意图[37]; (b) 增强型 (E-Mode) Fin 结构 HEMT 结构示意图[36]; (c) 三维栅结构转移特性曲线图[37]; (d) 常规结构与 Fin 结构 HEMT 转移特性曲线对比图[36]

Fig. 8. (a) Schematic diagram of a three-dimensional gate structure[37]; (b) schematic diagram of an enhanced (E-Mode) Fin-structured HEMT[36]; (c) transfer characteristic curve of the three-dimensional gate structure[37]; (d) comparison of transfer characteristic curves between conventional structure and Fin-structured HEMT[36].



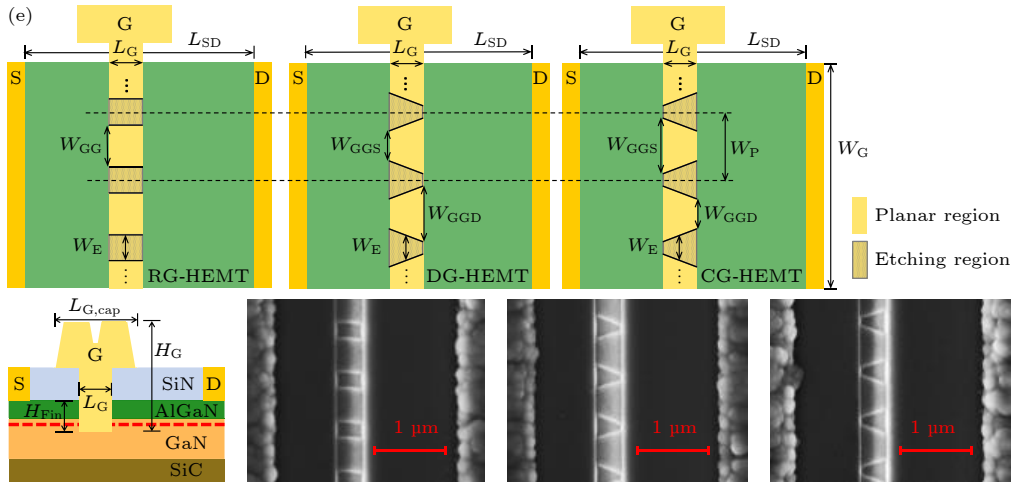


图 9 (a) “类鳍片”结构器件示意图^[38]; (b) 不同结构 HEMT 转移特性曲线^[38]; (c) “类鳍片”器件小信号模型^[39]; (d) 不同鳍片数器件线性度对比^[40]; (e) “发散形”鳍片结构示意图^[41]

Fig. 9. (a) Schematic diagram of the 'Fin-like' structure device^[38]; (b) transfer characteristic curves of HEMTs with different structures^[38]; (c) small-signal model of the 'Fin-like' device^[39] (d) linearity comparison of devices with different numbers of fins^[40]; (e) schematic diagram of the 'Divergent' fin structure^[41].

此外, FinFET 结构也被证实是提升器件线性度的有效途径,并在射频领域展现出应用价值. Wang 等^[38]提出了一种“类鳍片”结构,通过在栅极下方周期性地部分刻蚀势垒层如图 9(a) 所示,利用平面区域与凹槽区域阈值电压的差异实现跨导补偿,从而获得更为平坦的跨导曲线,如图 9(b). Zhao 等^[39]通过小信号建模进一步验证了这种“双峰”跨导叠加机制对线性度的提升作用,其小信号模型如图 9(c) 所示.然而,三维结构的引入也需权衡寄生参数的影响. Lee 等^[40]指出,鳍片数量过多会导致栅控寄生电容上升,进而引起高频性能退化;通过优化设计,他们在 Ka 波段确定了四鳍片结构为性能最优解,如图 9(d) 所示.该团队在鳍片几何形态方面进行了更深入的精细化研究,Chen 等^[41]探索了异形鳍片对输运特性的影响,发现采用源端窄、漏端宽的“发散形”鳍片结构可改善沟道内电场分布,如图 9(e) 所示,不仅有效抑制了短沟道效应,还显著降低了膝点电压,从而提升了功率放大器的能效.

综上所述,横向 GaN 基射频器件的技术演进呈现出极具代表性的发展脉络.为清晰展现这一历史演变与技术主线,如图 10 所示,梳理了横向器件具有里程碑意义的核心技术节点.可以看出,横向器件的发展已逐渐从早期的单纯依靠极限物理尺寸微缩,向更为复杂的能带工程与空间拓扑转移.无论是引入新型宽禁带势垒材料,还是开发新

型三维/倒置结构,横向器件始终沿着“尺寸极限、材料极化、结构立体”的这 3 个主要技术主干,不断刷新着微波与毫米波频段的功率和效率纪录.

3 基于体输运机制的纵向器件

3.1 纵向输运的物理特性

与依赖表面二维电子气进行横向输运的 HEMT 器件不同,纵向器件利用体材料在垂直方向上的漂移层进行电流传导.这种拓扑结构的改变,为突破射频功率器件的频率与功率密度极限提供了全新的物理维度.

首先,纵向结构在物理上实现了击穿电压与芯片面积的解耦,显著降低了高频应用中的关键寄生参数.在横向器件中,为了提高耐压,必须增大栅漏间距,这不可避免地增大了器件尺寸并引入寄生电感.相反, Perozek^[42]在其关于射频纵向器件的研究中指出,纵向 GaN FinFET 能够通过垂直漂移层厚度来控制耐压,从而在极小的占位面积上实现高功率密度.这种结构优势直接转化为射频性能的提升:由于栅极与漏极在垂直方向上分离,器件的栅漏寄生电容 (C_{gd}) 显著降低,从而有效提升了 f_{max} 和射频增益,使其更适用于高频开关与放大应用^[42],如图 11(a), (b) 所示.而纵向器件的导电通道深埋于半导体内部,理论上规避了表面钝化层界面的直接干扰.但是,这并不意味着纵向输运完全

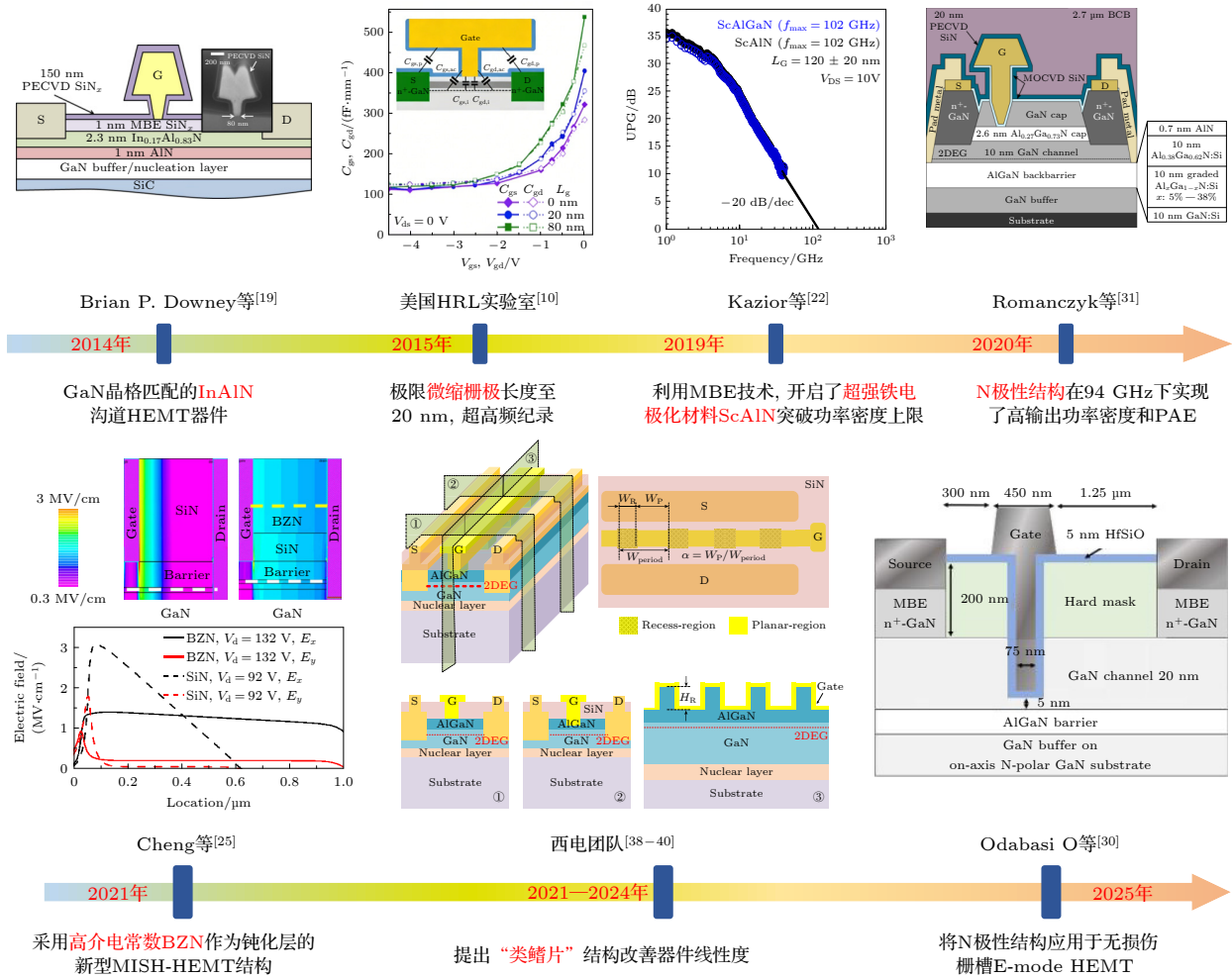


图 10 横向 GaN 基射频器件的关键技术演进节点

Fig. 10. Key technology evolution milestones of lateral GaN-Based RF devices.

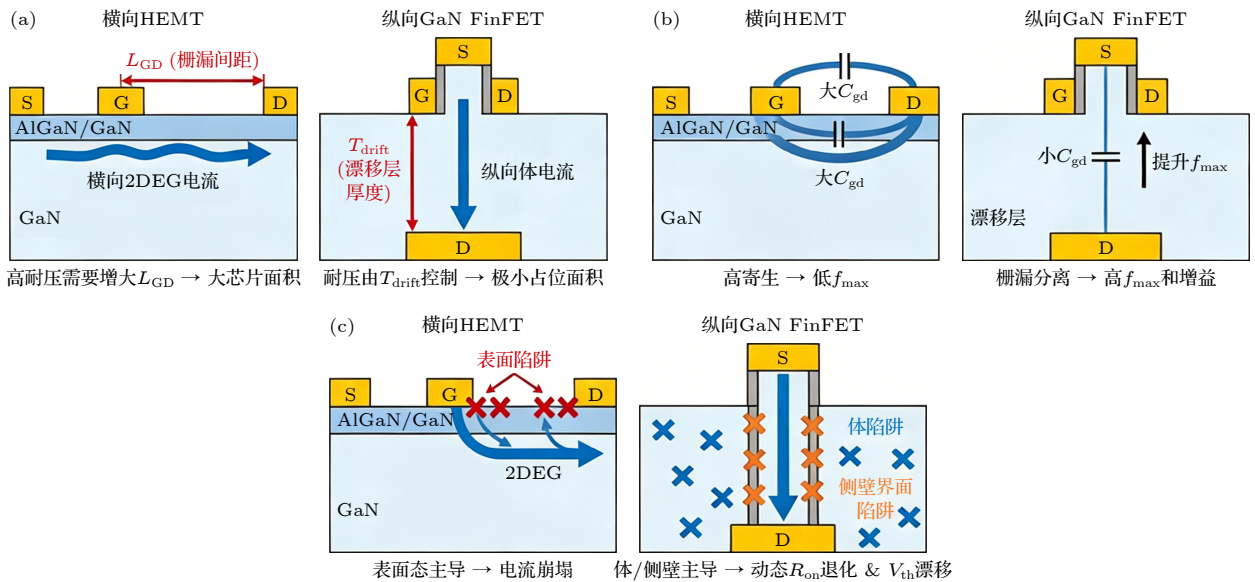


图 11 (a) 横向/纵向器件工作电压与面积的关系; (b) 横向/纵向器件栅漏寄生电容比较示意图; (c) 横向/纵向器件中的陷阱效应和动态不稳定性示意图

Fig. 11. (a) Relationship between the operating voltage and area of lateral/vertical devices; (b) schematic comparison of the gate-drain parasitic capacitance of lateral/vertical devices; (c) schematic of trap effects and dynamic instability in lateral/vertical devices.

免疫于陷阱效应. Ruzzarin 等^[43]对 GaN-on-GaN 垂直场效应晶体管的深入研究表明, 纵向器件的动态导通电阻退化与阈值电压漂移主要受控于体材料内部及沟道侧壁界面的深能级陷阱. 虽然仍存在动态不稳定性, 但其物理机制已从横向器件的“表面态主导”转变为“体/界面应力主导”. 这种物理特性的改变意味着通过改善外延层质量与优化侧壁工艺, 纵向器件具备实现优于传统横向结构的大信号线性度与可靠性的潜力^[44], 如图 11(c) 所示.

3.2 异质结双极型晶体管: 高线性度与功率增益的突破

第五代移动通信技术及未来通信系统的高速率、大容量和低延时特性, 要求核心射频器件在毫米波段同时实现高功率增益、优异线性度和高效率^[1]. 而异质结双极型晶体管作为一类重要的高频高线性半导体器件, 凭借其指数型的输入输出特性, 在本质上提供了比场效应晶体管更高的跨导效率和更优异的线性度. 目前, 基于 InGaP/GaAs 和 SiGe 材料体系的 HBT 已验证了在射频领域的成熟应用.

相较于传统窄禁带材料, GaN 基异质结双极型晶体管兼具宽禁带材料的高临界击穿场强和双极型器件的高驱动电路特性, 在高功率密度应用中展现出巨大潜力. 然而, 其发展长期受限于 p 型 GaN 基区的低电导率与欧姆接触困难. 针对上述挑战, 在材料生长与器件工艺方面已取得一系列重要突破.

在界面态与杂质扩散控制方面, Tseng 等^[44]指出, 高温外延过程中 Al/Si 互扩散是导致发射结性能退化的关键因素. 通过引入非故意掺杂 GaN 间隔层, 如图 12(a) 所示, 研究团队有效阻断了杂质扩散路径, 显著改善了异质结界面质量, 获得了最高的电流增益 $\beta \approx 2$, 是无间隔层器件 ($\beta \approx 0.8$) 的 2.5 倍. 在器件结构制备方面, 为规避干法刻蚀对 p 型基区造成的物理损伤, Zhang 等^[45,46]开发了选择性区域生长 (SAG) 技术, 成功制备出无刻蚀损伤的发射极结构, 如图 12(b) 所示. 该方法在保持基区晶格完整性的同时, 实现了 129 的电流增益和 $0.28 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 的超低比导通电阻, 并通过小信号测试获得 $f_T > 4 \text{ GHz}$ 的射频特性, 如图 12(c) 所示, 初步验证了 GaN HBT 的高频工作潜力.

在工艺优化方面, Kumabe 等^[47]研究表明, 通过将 ICP-RIE 刻蚀参数精细调控至低偏压模式,

如图 12(d), (e) 所示, 即使在无需再生长的简化工艺流程下, 亦可获得洁净的异质结界面与优异的器件输出特性. 制备的器件实现了高电流增益 (25)、高电流密度 (15.0 kA/cm^2) 和低偏移电压 (0.75 V) 等综合优异性能.

针对 p 型欧姆接触这一根本性难题, Joishi 等^[48]创新性地提出了基于隧道结的全 n 型接触架构, 如图 12(f) 所示. 该设计通过在基区集成重掺杂隧道结, 利用带间隧穿机制替代传统金属接触, 实现了 28 kA/cm^2 的高集电极电流密度, 为 GaN HBT 的实用化发展开辟了全新路径.

近年来, 针对 GaN HBT 中 p 型基区的本征材料缺陷与工艺损伤, 以中国科学院苏州纳米所团队为代表的研究机构开展了极具系统性的技术攻关, 通过材料改性与能带工程实现了突破. 首先在本征材料优化上, Yan 等^[49]通过在 p-GaN 基区引入微量 In 原子, 成功填补了镓空位, 将非辐射复合中心浓度降低了一个数量级, 使少子寿命由数十皮秒跃升至 793 ps, 从材料根源上大幅提升了载流子传输效率, 如图 13(a) 所示. 在能带工程设计方面, 针对异质结界面常见的电子阻挡势垒, Yan 等^[50]进一步开发了组分渐变 p-InGaN 基区结构. 通过在基区构建内建准电场加速少子输运, 结合 Si 掺杂轮廓调控以抹平集电极界面势垒, 成功将器件电流增益提升至 49, 如图 13(b) 所示. 为根治刻蚀工艺带来的界面损伤, 提出了一种 MOCVD 原位热处理与重掺杂 p^{++} -InGaN 接触层再生长相结合的协同工艺^[51], 如图 13(c) 所示. 利用高温 NH_3 环境原位修复刻蚀面氮空位, 配合无掩膜再生长技术降低基极电阻, 使得比导通电阻降至 $0.45 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 最大输出电流密度提升至 14 kA/cm^2 .

综上所述, GaN HBT 技术已完成了从界面材料改性、低损伤工艺优化 (SAG) 到器件拓扑创新的演进历程, 在电流增益、驱动密度及射频特性上均取得了突破性进展. 未来高性能 GaN 同质衬底的应用、隧道结结构的能带优化以及特征尺寸的微缩工艺将是研究的核心方向, 为实现器件在下一代高线性度 5G/6G 通信与先进雷达系统方向迈进.

3.3 热电子晶体管: 准弹道输运与太赫兹频段潜力

针对传统 GaN HBT 受限于空穴迁移率低及异质结界面复合的瓶颈, HET 作为一种全 N 型的

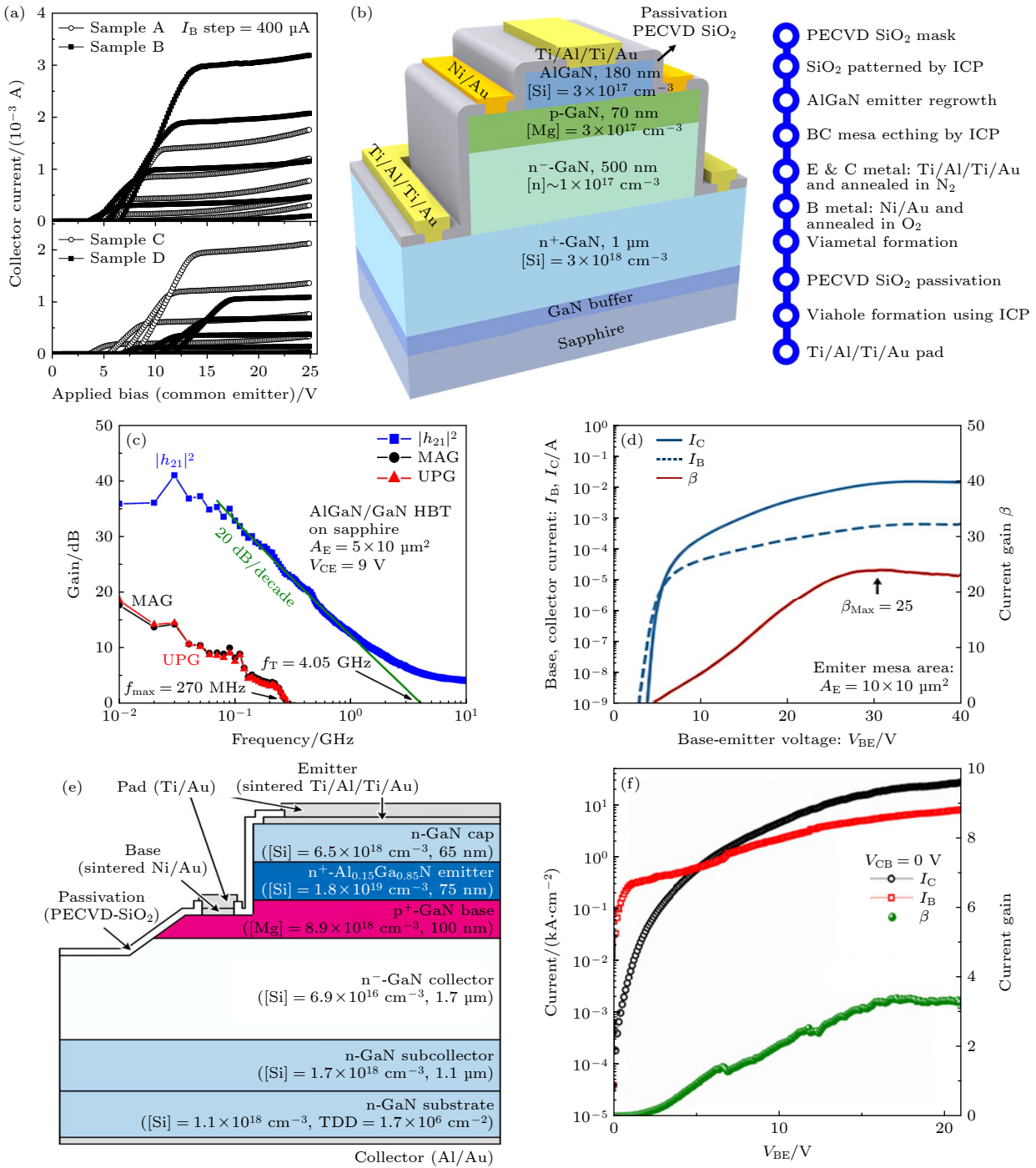


图 12 (a) 具有非故意掺杂 GaN 间隔层的 HBT 的 CE I - V [44]; (b) 基于选择性区域生长技术的 HBT 结构图及工艺流程 [45]; (c) HBT 的射频特性 [46]; (d) 低偏压刻蚀模式下制备的 AlGaIn/GaN HBT 的 Gummel 图 ($V_{BC} = 0$ V) [47]; (e) AlGaIn/GaN HBT 的器件结构 [47]; (f) 基于隧道结的全 n 型接触架构的 HBT Gummel 图 [48]

Fig. 12. (a) CE I - V of an HBT with unintentionally doped GaN spacer layer [44]; (b) HBT structure and process flow based on selective area growth technology [45]; (c) RF characteristics of HBT [46]; (d) Gummel plot of AlGaIn/GaN HBT prepared under low-bias etching mode ($V_{BC} = 0$ V) [47]; (e) device structure of AlGaIn/GaN HBT [47]; (f) Gummel plot of HBT with an all-n-type contact architecture based on tunnel junction [48].

垂直多数载流子器件, 为突破 III-N 族电子器件的频率极限提供了全新的器件模型. HET 的运作机理类似于经典的真空三极管, 其核心在于利用超薄基区实现电子的准弹道输运. 不同于 HBT 依赖少

数载流子的扩散机制, HET 通过势垒调控发射极注入的高能热电子, 使其在渡越纳米级基区时几乎不发生非弹性散射, 从而极大地缩短了渡越延迟, 展现出太赫兹频段应用的巨大潜力.

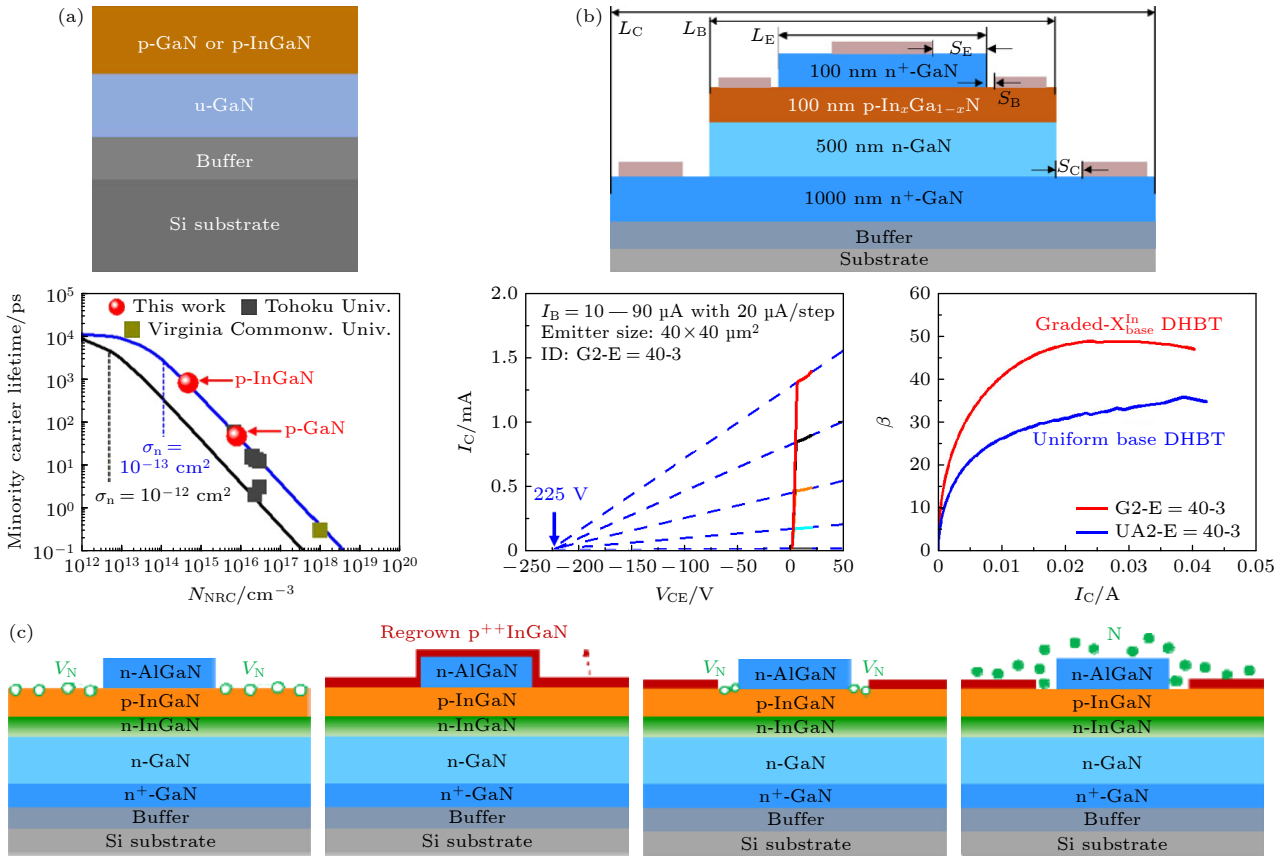


图 13 (a) 引入 In 原子的 p-GaN 的 HBT 器件结构^[49]; (b) 组分渐变 p-InGaN 基区结构^[50]; (c) MOCVD 原位热处理与重掺杂 p⁺⁺-InGaN 接触层再生长相结合的协同工艺^[51]

Fig. 13. (a) p-GaN structure with introduced In atoms^[49]; (b) composition-graded p-InGaN base region structure^[50]; (c) synergistic process combining MOCVD in-situ thermal treatment and regrowth of heavily doped p⁺⁺-InGaN contact layer^[51].

HET 采用发射极-基极-集电极的三端垂直结构, 其在电学上可等效为两个背对背连接的二极管. 该器件的工作过程可概括为“隧穿注入-弹道输运-能量过滤”3 个阶段. 发射极势垒通常由超薄 AlN 层 (约 2 nm) 或 AlGaIn/GaN 异质结构组成, 在正向偏压作用下, 电子通过隧穿或热发射机制获得能量并注入基区, 形成高能热电子流. 高 Al 组分势垒不仅有助于提升注入电子的初始动能, 还可通过极化效应在基区诱导出高密度电荷, 从而降低接触电阻. 基区通常设计为极薄的高掺杂 GaN 层, 当其厚度小于电子平均自由程时, 热电子将以弹道方式穿越该区域, 仅有少量因电子-声子散射或杂质散射而弛豫为基极电流. 集电极势垒则作为能量过滤器, 其势垒高度需略低于发射极势垒, 从而在允许高能热电子被集电极有效收集形成输出电流的同时, 抑制基区冷电子的泄漏. 上述复杂外延结构对生长工艺提出了极高要求: 不仅需要实现原子级平整的异质界面以维持相干输运, 还需精确调控各层势垒高度以平衡注入效率与漏电流, 这也是

HET 制备难度较大的关键原因.

热电子晶体管的概念最早可追溯至 1961 年 Mead^[7] 提出的 M-O-M-O-M 结构, 如图 14(a) 所示, 然而受限于当时金属基区中极短的电子平均自由程, 早期器件未能实现有效增益. 随着 III-N 族材料外延技术的进步, GaN 基 HET 凭借其材料固有的强极化场和高电子迁移率, 为该类器件的发展注入了新动力. Gupta 等^[52,53] 利用极化工程实现重要突破, 如图 14(b) 所示, 他们采用 InGaIn 极化偶极子作为集电极势垒, 有效抑制了漏电流, 并结合 AlN 发射极势垒, 在室温下实现了电流增益 (β) 大于 3.5 的工作性能. 在此基础上, Yang 等^[54] 通过优化发射极非故意掺杂 GaN 层, 如图 14(c) 所示, 提升了电子注入的准垂直性, 将电流增益进一步提高至 14.5, 有力证实了 GaN HET 中准弹道输运模式的主导作用.

尽管当前实验研究仍主要集中于直流性能表征, 理论模拟已展现出 GaN HET 在超高频段的广阔前景. 基于蒙特卡罗方法的仿真结果表明, 对于

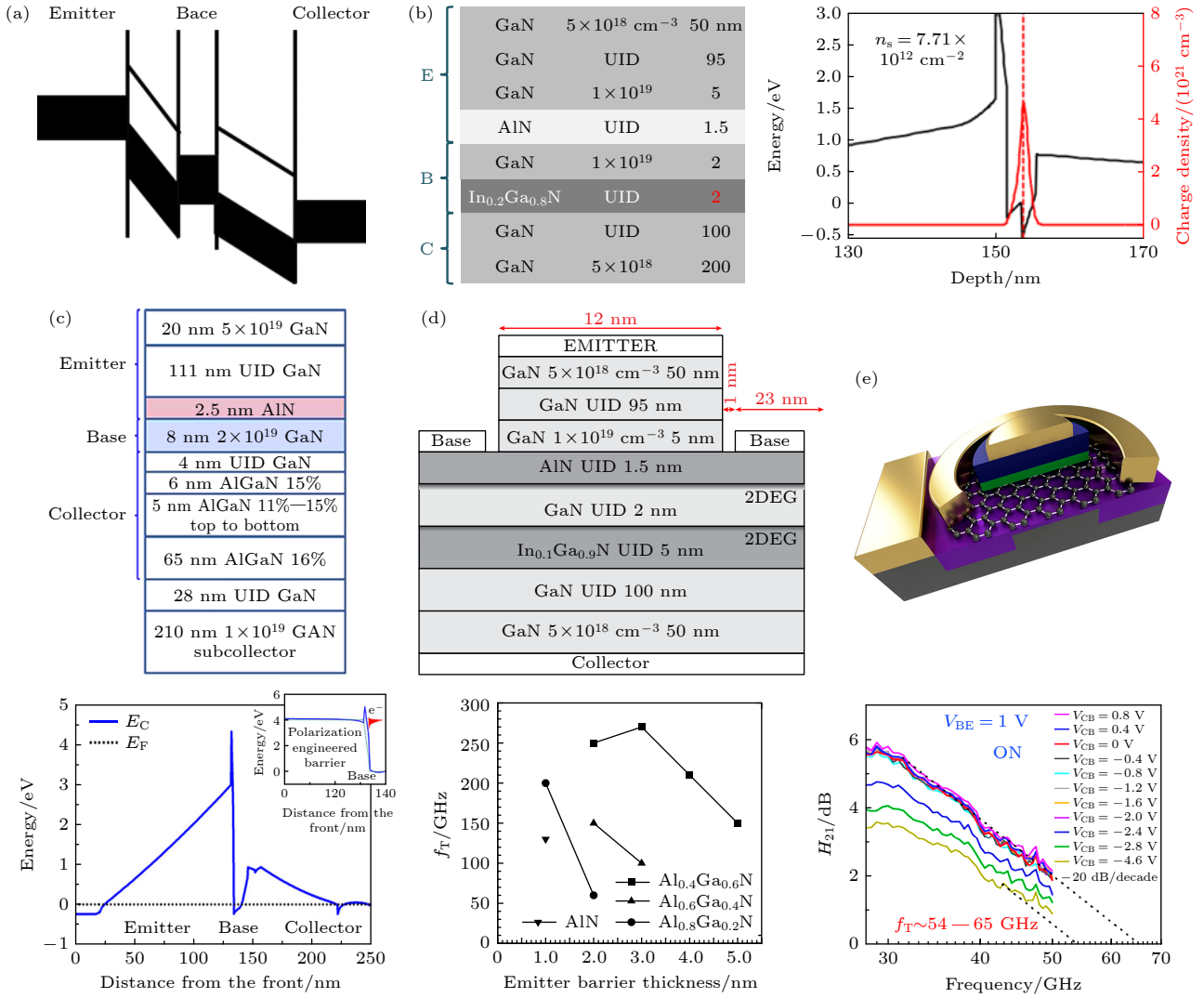


图 14 (a) 加州理工实验室首次提出的 M-O-M-O-M 三极管结构^[7]; (b) InGaN 极化偶极子极化工程势垒结构 HET 外延结构及能带^[52,53]; (c) 具有非故意掺杂 GaN 层 HET 器件外延结构^[54]; (d) 基于蒙特卡罗方法的仿真 HET 结构及频率随势垒 Al 组分变化图^[55]; (e) 石墨烯基热电子晶体管结构及小信号增益^[56]

Fig. 14. (a) The M-O-M-O-M transistor structure first proposed by the Caltech laboratory^[7]; (b) InGaN polarized dipole polarization-engineered barrier structure HET epitaxial structure and energy band^[52,53]; (c) HET device epitaxial structure with unintentionally doped GaN layer^[54]; (d) simulated HET structure based on the Monte Carlo method and the frequency variation with barrier Al composition^[55]; (e) Graphene-based hot electron transistor structure and small-signal gain^[56].

基区厚度为 12 nm 的 GaN HET, 其本征截止频率 (f_T) 理论值可达 120 GHz, 如图 14(d) 所示, 若能进一步优化注入能量分布, f_T 更可提升至 270 GHz, 同时电流密度维持在 $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 的高水平^[55]. 近年来, 二维材料也被引入 HET 设计中, 并展现出优异的射频特性. 例如, Liang 等^[56] 构建的石墨烯基垂直 HET, 利用石墨烯原子层厚度所带来的超低散射率, 首次在实验中实现了 65 GHz 的本征截止频率, 如图 14(e) 所示, 尽管其电流密度仍低于 GaN 基器件数个量级, 这一结果为后摩尔时代超高速射频器件的探索开辟了新路径.

GaN HET 器件通过单极性热电子注入与纳

米基区弹道输运机制, 从物理上规避了传统晶体管的渡越时间限制. 尽管目前仍面临基区漏电控制困难、基极电阻较高及高频测试数据匮乏等挑战, 但随着势垒工程 (如共振隧穿发射极) 与能带结构设计的深入, HET 有望填补电子器件在太赫兹频段的空白, 成为未来超高速信号处理的核心器件.

为清晰展现纵向 GaN 射频器件的技术演进脉络, 图 15 系统梳理了以 HBT 和 HET 为代表的标志性技术突破节点. 纵观其发展历程, 纵向架构并未依循单一的物理尺寸微缩路径, 而是紧扣“外延质量提升、欧姆接触突破与输运机制创新”三大核心主线展开. 从底层工艺的无损化演进到能带工程

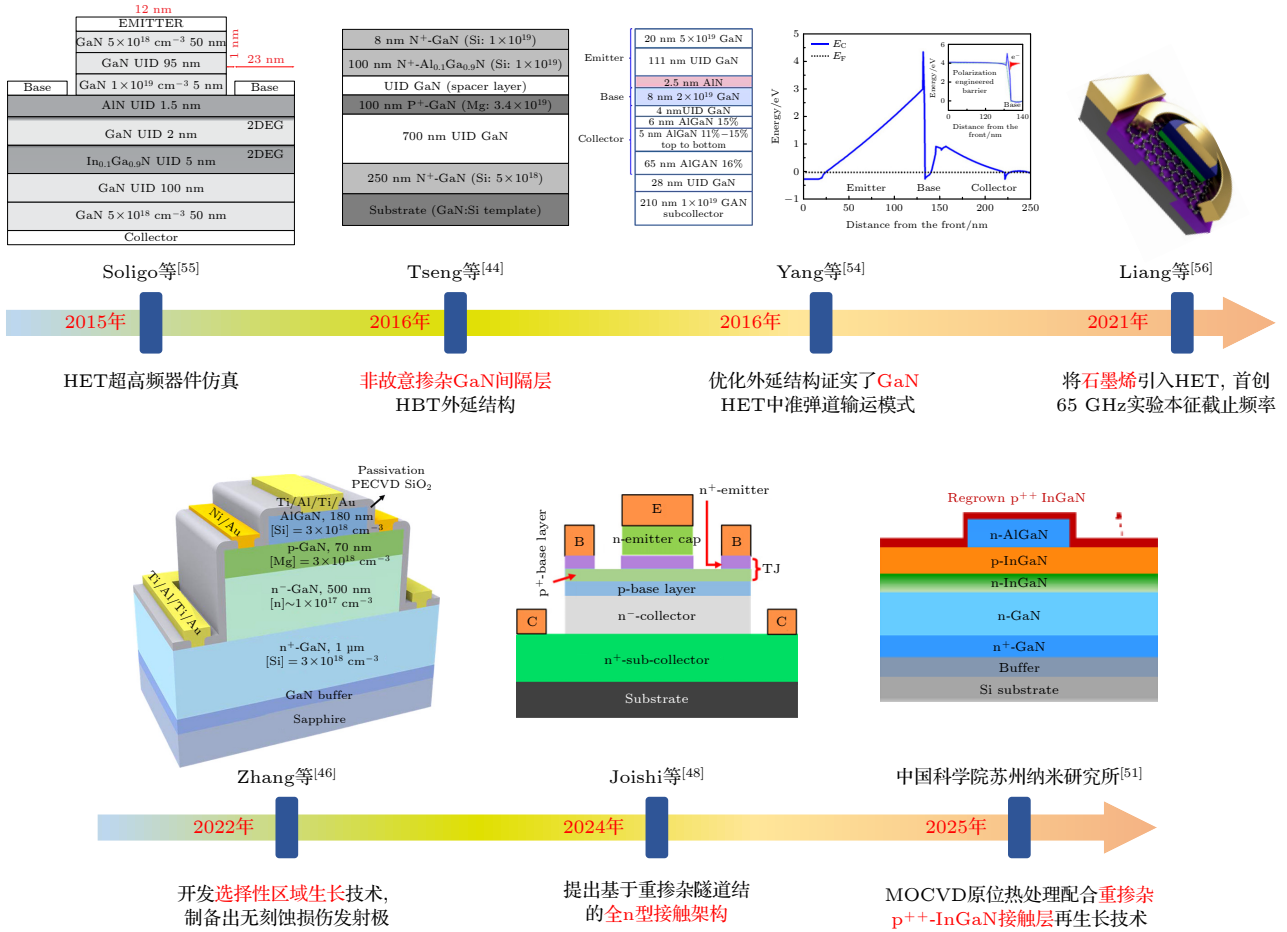


图 15 纵向 GaN 基射频器件的标志性技术突破节点

Fig. 15. Key technological breakthrough milestones of longitudinal GaN-based RF devices.

的精细调控, 纵向器件正不断跨越早期的材料壁垒, 向着释放极限功率密度与探索太赫兹频段准弹道运输的终极目标稳步迈进。

4 总结与展望

本文系统梳理了 GaN 基射频电子器件从平面横向拓扑向纵向体运输结构演进的内在物理逻辑与技术脉络. 以 AlGaIn/GaN HEMT 为代表的横向器件, 依托极化诱导的高密度二维电子气及成熟的平面工艺, 已在微波频段确立了显著优势. 然而, 随着器件微缩逼近极限, 表面态诱发的电流崩塌, 以及由横向电场决定的“击穿电压与芯片面积”问题, 成为制约其大功率特性的固有瓶颈.

针对上述局限, 器件架构的空间拓展成为核心技术路线. 三维栅控结构与 N 极性面倒置异质结的引入, 有效抑制了短沟道效应并增强了载流子限域. 而为从根本上重塑功率密度上限, 拓扑结构进

一步向纵向体运输转移. 纵向器件依靠垂直漂移层承担耐压, 不仅在物理上解耦了电场分布与芯片占位面积, 且深埋于体内的导电通道有效规避了表面陷阱散射. 特别是 GaN 基 HBT, 通过基区组分与能带工程, 大幅削弱了高注入条件下的跨导非线性, 确立了其在大信号动态稳定性上的优势. 为清晰阐释器件从横向平面结构向纵向体运输结构演进的内在物理逻辑与技术优劣势, 表 2 系统对比了两者技术路径在导电机理、耐压特性及频率范围等方面的核心差异.

基于上述技术路径的演进规律与核心性能差异, 高频、高功率 GaN 射频器件的发展路线可清晰划分为 3 个阶段. 首先, 以平面 HEMT 为基础, 深挖材料潜力. 通过引入 InGaIn, InAlIn 及 ScAlIn 等新型超强极化势垒材料, 大幅提升 2DEG 面密度; 配合极短栅长微缩与高 k 介质钝化工艺, 在 5G Sub-6 GHz 及常规毫米波频段持续巩固其功率与成熟度优势. 其次, 面对更高频段的短沟道效应

表 2 横向与纵向 GaN 基射频器件核心特性比较
Table 2. Comparison of core technical characteristics of lateral and vertical GaN-Based RF devices.

特性对比	导电机制	耐压特性/V	频率范围(f_T/f_{max})	陷阱效应	热量分布
横向器件	表面输运	<200	<500 GHz	表面态主导, 易引发表面漏电	集中于栅极, 热阻高
HBT	体输运	<150	<10 GHz	无表面态	热量耗散均匀
HET	准弹道输运	<10	理论0.1—1 THz	无表面态	区域分布, 热阻适中

与大功率需求, 发展路线向空间拓展转移. 一方面, 引入 FinFET 与 N 极性面倒置结构强化静电控制; 另一方面, 集中攻克高质量同质外延与无损刻蚀工艺, 推动纵向体输运架构在 6G 通信与超高功率雷达合成阵列中的实用化, 以实现耐压、功率密度与线性度的全面进步. 最后, 在器件级物理尺寸微缩遭遇瓶颈后, 技术重心将转向量子效应探索. 在极端的太赫兹频段, 利用热电子晶体管及原子级二维材料基区实现的准弹道输运机制, 打破传统载流子渡越时间限制, 为固态电子器件在 THz 频段的应用奠定基础.

面向 6G 通信与先进有源相控阵雷达的严苛需求, 单靠器件级尺寸微缩已无法维系性能的跨越式增长, 未来 GaN 射频技术的演进将高度依赖系统级异构集成与前沿物理机制的深度融合. 在核心射频场景中, 经由能带工程与拓扑优化的 HEMT 及纵向 HBT 仍将作为绝对的技术基石. 未来的性能突破点正由“器件级”上升至“系统级”: 将高性能 GaN 射频前端与高密度硅基 CMOS 逻辑电路进行晶圆级的三维异构集成, 可实现系统能效的代际跃升; 同时, 金刚石等超高导热衬底的引入, 为破解大功率运行下的热耗散瓶颈提供了切实可行的途径. 此外, 针对太赫兹频段的前沿探索, 尽管 HET 在理论上具备突破频率极限的潜力, 但客观而言, 受限于极其苛刻的外延生长窗口、基区漏电问题以及偏低的驱动电流, 其在短期内尚无法成为通用方案. 但随着石墨烯等二维材料作为原子级基区的引入, HET 有望精准填补 THz 频段的增益空白, 在超高速信号处理与高频传感等特定前沿领域构筑其不可替代的技术地位.

总之, 新一代 GaN 射频技术正步入材料创新、三维/纵向拓扑演进与异构集成深度融合的新阶段. 横纵向器件将在各自适用的频段与功率区间内持续演进并形成优势互补, 共同实现未来极高频射频系统的协同设计.

参考文献

- [1] Suzuki M, Ishimura S, Tanaka K, Nanba S, Nishimura K 2017 *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM) 2017* pp169–170
- [2] Zhang J F, Wang P Y, Xue J S, Zhou Y B, Zhang J C, Hao Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 117305 (in Chinese) [张金凤, 王平亚, 薛军帅, 周勇波, 张进成, 郝跃 2011 物理学报 **60** 117305]
- [3] Hoo Teo K, Zhang Y H, Chowdhury N, Rakheja S, Ma R, Xie Q Y, Yagyu E, Yamanaka K, Li K X, Palacios T 2021 *J. Appl. Phys.* **130** 160902
- [4] Matys M, Yamada A, Ohki T 2025 *Phys. Status Solidi RRL* **19** 2400379
- [5] Guo H J, Duan B X, Yuan S, Xie S L, Yang Y T 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 167301 (in Chinese) [郭海君, 段宝兴, 袁嵩, 谢慎隆, 杨银堂 2017 物理学报 **66** 167301]
- [6] Suda J 2022 *International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA, December 3–7, 2022 pp35.7.1–35.7.4
- [7] Mead C A 1961 *J. Appl. Phys.* **32** 646
- [8] Soligo R, Sabatti F, Chowdhury S, Saraniti M 2017 *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 4442
- [9] Jones E A, Wang F F, Costinett D 2016 *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* **4** 707
- [10] Tang Y, Shinohara K, Regan D, Corrian A, Brown D, Wong J, Schmitz A, Fung H, Kim S, Micovic M 2015 *IEEE Electron Device Lett.* **36** 549
- [11] Zhang Y C, Huang S, Wei K, Zhang S, Wang X H, Zheng Y K, Liu G G, Chen X J, Li Y K, Liu X Y 2020 *IEEE Electron Device Lett.* **41** 701
- [12] Sohel S H, Xie A, Beam E, Xue H, Razzak T, Bajaj S, Cao Y, Lee C, Lu W, Rajan S 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 522
- [13] Lu H, Deng L G, Yang L, Hou B, Zhou L K, Zhang M, Chen L, Wu M, Yu Q, Cheng K, Ma X H, Hao Y 2024 *IEEE Electron Device Lett.* **45** 960
- [14] Zhang Y C, Wang Z Z, Xu S R, Chen D Z, Bao W M, Zhang J C, Hao Y 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 222107
- [15] Li H R, Wienecke S, Romanczyk B, Ahmadi E, Guidry M, Zheng X, Keller S, Mishra U K 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 073501
- [16] Amano H, Baines Y, Beam E, Borga M, Bouchet T, Chalker P R, Charles M, Chen K J, Chowdhury N, Chu R M, et al. 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 163001
- [17] Meneghini M, Rossetto I, Santi C D, Rampazzo F, Tajalli A, Barbato A, Ruzzarin M, Borga M, Canato E, Zanoni E 2021 *J. Appl. Phys.* **130** 181101
- [18] Kuzmik J 2001 *IEEE Electron Device Lett.* **22** 510
- [19] Downey B P, Meyer D J, Katzer D S, Rumbaugh J A, Storm D F, Jin C L, Pan M 2014 *IEEE Electron Device Lett.* **35** 527
- [20] An S, Mi M 2024 *Sci. China Inf. Sci.* **67** 119402
- [21] Zhou Y W, Mi M H, Han Y T, Wang P F, Chen Y L, Liu J L, Gong C, Yang M, Zhang M, Zhu Q, Ma X H, Hao Y 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 43
- [22] Kazior T E, Chumbes E M, Schultz B D, Logan J, Meyer D J, Hardy M T 2019 *IEEE MTT-S International Microwave*

Symposium (IMS) 2019 1136–1139

- [23] Green A J, Gillespie J K, Fitch R C, Walker D E, Lindquist M, Crespo A, Brooks D, Beam E, Xie A, Kumar V, Jimenez J, Lee C, Cao Y, Chabak K D, Jessen G H 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 1056
- [24] Green A J, Moser N, Miller N C, Liddy K J, Lindquist M, Elliot M, Gillespie J K, Fitch R C, Gilbert R, Walker D E, Werner E, Crespo A, Beam E, Xie A, Lee C, Cao Y, Chabak K D 2020 *IEEE Electron Device Lett.* **41** 1181
- [25] Cheng J, Rahman M W, Xie A, Xue H, Sohel S H, Beam E 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 3333
- [26] Krause S, Streicher I, Waltereit P, Kirste L, Brückner P, Leone S 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 17
- [27] Rajan S, Wong M, Fu Y, Wu F, Speck J S, Mishra U K 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** L1478
- [28] Wang X B, Zhao Z P, Feng Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 080202 (in Chinese) [王现彬, 赵正平, 冯志红 2014 物理学报 **63** 080202]
- [29] Shrestha P, Guidry M, Romanczyk B, Hatui N, Wurm C, Krishna A, Pasayat S S, Karnaty R R, Keller S, Buckwalter J F, Mishra U K 2020 *IEEE Electron Device Lett.* **41** 681
- [30] Odabasi O, Khan M I, Zhai X, Rana H, Ahmadi E 2025 *IEEE Electron Device Lett.* **46** 1505
- [31] Romanczyk B, Li W Y, Guidry M, Hatui N, Krishna A, Wurm C, Keller S, Mishra U K 2020 *IEEE Electron Device Lett.* **41** 1633
- [32] Liu W J, Romanczyk B, Guidry M, Hatui N, Wurm C, Liu W Y, Shrestha P, Zheng X, Keller S, Mishra U K 2021 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **31** 748
- [33] Akso E, Collins H, Clymore C, Li W Y, Guidry M, Romanczyk B, Wurm C, Liu W J, Hatui N, Hamwey R, Shrestha P, Keller S, Mishra U K 2023 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **33** 683
- [34] Collins H, Akso E, Clymore C J, Khan K, Hamwey R, Hatui N, Guidry M, Keller S, Mishra U K 2024 *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters* **34** 907
- [35] Aksoy E, Collins H, Khan K, Keller S, Mishra U K 2024 *IEEE Microw. Wirel. Technol. Lett.* **34** 183
- [36] Zhou Y W, Mi M H, Gong C, Wang P F, Wen X Y, Chen Y L, Liu J L, Yang M, Zhang M, Zhu Q, Ma X H, Hao Y 2024 *IEEE Trans. Electron Devices* **71** 1383
- [37] Chakrabarty A, Sahoo N, Panigrahy A K, Nayak A 2024 *Phys. Scr.* **99** 075020
- [38] Wang P F, Ma X H, Mi M H, Zhang M, Zhu J J, Zhou Y W, Wu S, Liu J L, Yang L, Hou B, Hao Y 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 1563
- [39] Zhao Z Y, Chen Y L, Lu Y, Zhang H S, Yi C P, Wang Y C, Zhou J D, Liu W L, Wang P F, Mi M H, Zhang M, Ma X H, Hao Y 2022 *IEEE Trans. Electron Devices.* **69** 6624
- [40] Lee M W, Lin Y C, Hsu H T, Gamiz F, Chang E Y 2023 *Micromachines* **14** 931
- [41] Chen Y L, Zhu Q, Zhang M, Mi M H, Zhu J J, Guo S Y, Zhou Y W, Wang P F, Gong C, Zhao Z Y, Ma X H, Hao Y 2024 *IEEE Trans. Electron Devices* **71** 1448
- [42] Perozek J A 2022 *M. S. Thesis* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [43] Ruzzarin M, Meneghini M, Bisi D, Sun M, Palacios T, Meneghesso G, Zanoni E 2017 *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 3126
- [44] Tseng Y T, Lin C W, Yang W C, Chen K Y, Chang K Y, 2016 *IEEE Trans. Electron Devices* **63** 4262
- [45] Zhang L, Cheng Z, Zeng J P, Lu H X, Jia L F, Ai Y J, Zhang Y 2019 *IEEE Trans. Electron Devices* **66** 1197
- [46] Zhang L, Wang X Y, Zeng J P, Jia L F, Cheng Z, Ai Y J, Liu Z, Tian W, Zhang Y 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 6633
- [47] Kumabe T, Watanabe H, Ando Y, Tanaka A, Nitta S, Honda Y, Amano H 2022 *Appl. Phys. Express* **15** 046506
- [48] Joishi C, Rahman S I, Rajan S 2024 *IEEE Trans. Electron Devices* **71** 6460
- [49] Yan S M, Liu J X, Zhou Y, Sun X J, Zhong Y Z, Chen X, Tang Y J, Guo X L, Sun Q, Yang H 2022 *Appl. Phys. Express* **15** 075501
- [50] Yan S M, Wang C, Zhao Y, Zhang J 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 1632
- [51] Li Q, Yan S M, Liu J X, Zhou Y, Sun X J, Gao H W, Chen X, Li W W, Zhong Y Z, Sun Q, Yang H 2025 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **58** 495102
- [52] Gupta G, Ahmadi E, Hestroffer K, Acuna E, Mishra U K 2015 *IEEE Electron Device Lett* **36** 439
- [53] Gupta G, Laurent M, Li H R, Suntrup D, Acuna E, Keller S, Mishra U K 2015 *IEEE Electron Device Lett.* **36** 23
- [54] Yang Z C, Zhang Y W, Krishnamoorthy S, Nath D N, Khurgin J B, Rajan S 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 192101
- [55] Soligo R, Chowdhury S, Gupta G, Mishra U, Saraniti M 2015 *IEEE Electron Device Lett.* **36** 669
- [56] Liang B W, Chang W H, Lin Y C, Chen P C, Zhang Y T, Simbulan K B, Li K S, Chen J H, Kuan C H, Lan Y W 2021 *ACS Nano* **15** 6756

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

A review of the research and development of high-frequency, high-power gallium nitride radio-frequency electronic devices*

REN Weiyu CHANG Zhijie LV Tao HOU Bin WU Mei
ZHANG Meng LU Hao YANG Ling[†] MA Xiaohua HAO Yue

(*National Engineering Research Center for Wide Bandgap Semiconductors, School of Integrated Circuits,
Xidian University, Xi'an 710100, China*)

(Received 30 November 2025; revised manuscript received 23 March 2026)

Abstract

The relentless push toward 6G communications and advanced radar systems demands unprecedented power and frequency metrics from radio-frequency (RF) front-ends. While gallium nitride (GaN) remains the undisputed cornerstone of high-power RF electronics, traditional lateral architectures are colliding with fundamental physical scaling limits. This review systematically maps the evolutionary trajectory of GaN RF devices, spotlighting the critical paradigm shift from lateral surface conduction to vertical bulk and quasi-ballistic transport mechanisms. We first critically assess the physical bottlenecks of lateral high-electron-mobility transistors (HEMTs)—specifically the severe short-channel and localized thermal hotspot effects near the 20-nm gate limit. To mitigate these, we evaluate recent structural interventions, including polarization-driven barrier engineering and 3D FinFET topologies. To transcend planar constraints, we detail the transition toward vertical architectures designed to fundamentally decouple breakdown voltage from the device footprint. For heterojunction bipolar transistors (HBTs), recent breakthroughs in non-destructive epitaxial growth and tunnel-junction contacts are highlighted for conquering long-standing p-GaN ohmic challenges. Furthermore, we explore the frontier of hot-electron transistors (HETs), where nanometer-scale bases enable quasi-ballistic transport to unlock the terahertz (THz) regime. Ultimately, the future of GaN RF electronics hinges not on further geometric miniaturization, but on vertical topological innovations and system-level heterogeneous integration, forging the indispensable hardware foundation for next-generation extreme-power applications.

Keywords: GaN, high electron mobility transistor, heterojunction bipolar transistor, hot electron transistor

DOI: [10.7498/aps.75.20251631](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251631)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251631](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251631)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62234009, 62474135, 62090014, 62404165, 62404175), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. QTZX25069), the National Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (Grant No. BX20200262), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. GZC20232022, 2021M692499, 2023M732730, 2024M752517), and the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2024C-YBQN-0611).

[†] Corresponding author. E-mail: yangling@xidian.edu.cn



高频高功率氮化镓射频电子器件研究发展综述

任威宇 常志杰 吕滔 侯斌 武玫 张濛 芦浩 杨凌 马晓华 郝跃

A review of the research and development of high-frequency, high-power gallium nitride radio-frequency electronic devices

REN Weiyu CHANG Zhijie LV Tao HOU Bin WU Mei ZHANG Meng LU Hao YANG Ling MA Xiaohua HAO Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080706 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251631

CSTR: 32037.14.aps.75.20251631

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251631>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重离子辐射对AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管低频噪声特性的影响

Effect of heavy ion radiation on low frequency noise characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors

物理学报. 2024, 73(3): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20221360>

氢离子注入GaIn高电子迁移率晶体管栅极正向输运、退化与击穿

Forward transport, degradation, and breakdown of hydrogen-ion-implanted GaIn high electron mobility transistor gate

物理学报. 2026, 75(5): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251343>

磷化铟高电子迁移率晶体管外延结构材料抗电子辐照加固设计

Structure parameters design of InP based high electron mobility transistor epitaxial materials to improve radiation-resistance ability

物理学报. 2022, 71(3): 037202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211265>

微波GaIn器件温度效应建模

Modeling of temperature effect on DC characteristics of microwave GaIn devices

物理学报. 2024, 73(17): 177101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240765>

喷墨打印高迁移率铟锌锡氧化物薄膜晶体管

Inkjet printing high mobility indium-zinc-tin oxide thin film transistor

物理学报. 2024, 73(12): 128501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240361>

多沟道GaIn电子迁移率晶体管自热效应的电热耦合模拟及场板结构优化

Electrothermal modeling of self-heating effects in multichannel GaIn HEMTs and optimization of field plate structures

物理学报. 2026, 75(7): 128501 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251466>