

专题: 半导体物理与器件

氮化镓功率集成*

徐云松^{1)2)3)#} 季浩天^{1)2)3)#} 王浩宇¹⁾ 邱恒志¹⁾ 龚瑞琦¹⁾ 丁申磊¹⁾
蒋昀洲¹⁾ 顾江敏¹⁾²⁾³⁾ 李昂¹⁾²⁾³⁾ 魏进^{4)†} 刘雯^{1)2)3)‡}

1) (西交利物浦大学智能工程学院, 苏州 215123)

2) (西交利物浦大学, 先进半导体研究中心, 苏州 215123)

3) (利物浦大学, 利物浦 L69 3GL, 英国)

4) (北京大学集成微纳电子学系, 北京 100871)

(2026年2月24日收到; 2026年3月29日收到修改稿)

氮化镓 (GaN) 作为宽禁带半导体材料, 具有高临界击穿电场、高电子饱和速度及优异的高温稳定性, 在高频、高功率密度功率转换系统中展现出巨大潜力. 本文系统综述了 GaN 功率集成技术的研究进展, 重点分析了 GaN 作为宽禁带半导体在高频、高温、高功率密度应用中的优势. 本文围绕 GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 器件的底层技术架构与核心应用模块的设计和性能分析等方面展开论述. 研究表明, GaN 功率集成电路在提升系统效率、功率密度与可靠性方面具有显著潜力, 为新能源汽车、航空航天等极端环境下的电源系统提供了可行的技术路径.

关键词: 氮化镓功率集成, 高电子迁移率晶体管, 单片集成电路

DOI: 10.7498/aps.75.20260273

CSTR: 32037.14.aps.75.20260273

1 引言

氮化镓 (GaN) 作为宽禁带半导体 (亦称为第三代半导体) 的典型代表, 正深刻变革功率电子技术的发展格局. 凭借其独特的材料与器件特性, GaN 不仅突破了传统硅 (Si) 器件的性能瓶颈, 更推动功率电子从分立器件向高度集成化方向演进. 从消费电子的快充技术到电动汽车动力系统, 从数据中心供电到航空航天极端环境应用, GaN 功率集成技术正成为提升能源转换效率、缩小设备体积、降低全生命周期成本的关键支撑技术, 其发展与应用对新能源革命和高端制造业升级具有

重要意义.

图 1 对比了 3 种主流半导体材料的相关参数. GaN 作为宽禁带半导体, 其禁带宽度是 Si 的 3 倍. 这一特性使其能够承受更高的工作温度 (理论结温可达 400 °C) 和更强的电场强度, 显著降低高温下的漏电流; 较高的临界电场强度使得在相同耐压需求下, GaN 器件可通过更小的漂移区长度大幅降低导通电阻 (R_{ON}), 实现更低的传导损耗; GaN 异质结 (AlGaN/GaN) 中形成的二维电子气 (2DEG) 具有极高的电子迁移率, 这一特性使 GaN 器件的品质因数 ($R_{ON} \times Q_g$) 优于 SiC, 开关损耗显著降低, 尤其适合高频应用; 饱和电子速度决定器件开关速度与高频性能, GaN 器件在高电场下仍

* 新材料重大专项 (批准号: 2024ZD06049XX)、苏州独墅湖科教创新区 (批准号: CJRH2024201) 和西交利物浦科技发展基金 (批准号: RDF-22-01-110) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: Jin.We@pku.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: Wen.Liu@xjtlu.edu.cn

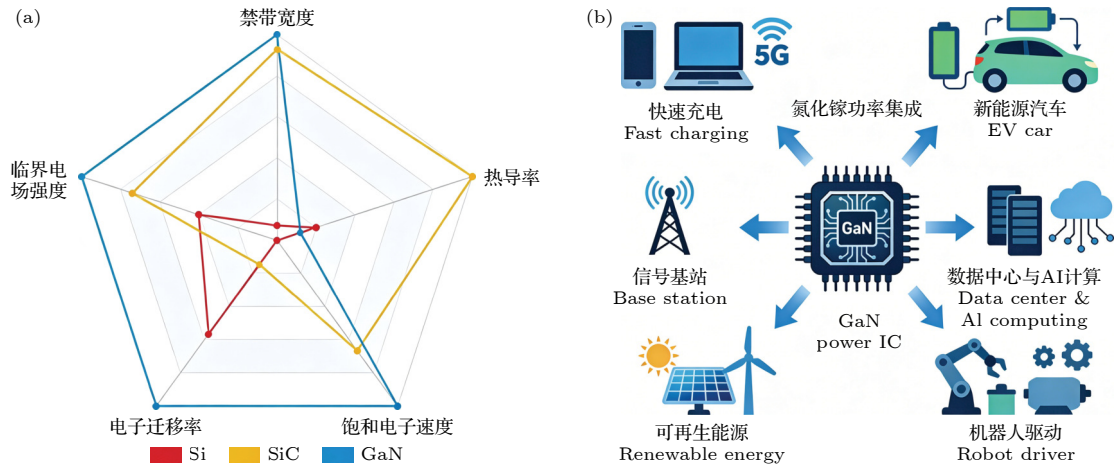


图 1 (a) Si, SiC, GaN 材料特性雷达图; (b) GaN 功率集成的典型应用

Fig. 1. (a) Radar diagram of material properties of Si, SiC, and GaN; (b) typical applications of GaN power integration.

能保持高速载流子输运, 具备极快的开关瞬态响应; 热导率决定器件散热能力, 直接影响功率集成中的结温控制, 尽管 GaN 本征热导率低于 SiC, 但通过异质集成技术可有效优化散热。

基于上述材料特性, GaN 器件能够较好适配新能源汽车、航空航天等极端工况。尽管基于 GaN 器件的功率集成技术在上述领域尚处于规模化应用前期, 但面向未来高效率、高功率密度、轻量化与高频化电能变换需求, 其凭借低开关损耗、高开关速度、低寄生效应及易于单片集成等优势, 有望显著提升系统效率与动态性能, 并有效减小磁性器件、散热系统及整机体积重量, 因此具有重要的应用前景与战略价值。例如, 在航空航天领域, 星载、机载等电源需在超宽温度循环、真空无对流散热等严苛环境下长期稳定工作, 对电源模块的体积重量、在轨长期可靠性与极端环境抗扰能力提出了近乎苛刻要求。GaN 的宽禁带、高临界击穿电场与优异的高温稳定性, 可完美适配上述应用场景对于宽温循环与瞬态高温的工况需求, 同时 GaN 材料具有天然的抗辐射特性, 可显著降低空间辐射引发的器件性能退化风险, 较好适配航空航天领域的特殊应用需求。

随着近年的技术迭代, GaN 商用功率器件已形成成熟的产品线。GaN 产品的商业化发展以 2004 年 Eudyna 推出全球首款商用碳化硅基氮化镓 (GaN-on-SiC) 射频 HEMT 为起点^[1], 正式开启了氮化镓器件从实验室走向产业应用的进程; 2009 年 EPC 发布硅基氮化镓 (GaN-on-Si) 增强型 (E-mode) HEMT^[2]; 2013 年 Transphorm 推出 GaN

HEMT 和 Si MOSFET 的级联架构^[3], 共同推动了 GaN 向功率转换领域渗透。2018 年英飞凌推出的栅极注入技术 (GIT) HEMT 具有快速导通和关断速度, 是实现高功率密度应用的理想选择^[4]; 国内厂商英诺赛科在 2021 年推出国产高压增强型 GaN HEMT, 实现技术自主突破^[5]。

为了能够最大化地利用 GaN HEMT 高频率、高功率和耐高温等特性, GaN 单片集成电路 (IC) 是宽禁带半导体器件发展的必然趋势。与传统由分立功率器件、硅基驱动/保护芯片在 PCB 上互连构成的方案相比, 后者通常需要更大的封装与布局空间, 且键合线、焊盘与走线会引入额外寄生电感和电容。GaN 器件具有极高的开关速度和较大的 dv/dt 与 di/dt , 上述互连寄生会进一步诱发振铃、EMI、附加开关损耗及器件过压应力, 从而削弱 GaN 高频高效的优点。相应地, 在同一 GaN 平台上实现功率开关、驱动、保护等功能的单片集成, 可有效缩短功率回路与门极回路、降低总门极电感和共源电感以及减小信号畸变。此外, 集成式 GaN 功率器件已能将驱动与其他功能模块纳入紧凑封装, 从而在提升效率和功率密度的同时, 减少外部元件数量与系统装配复杂度, 改善长期运行可靠性。在产业界方面, GaN 可异质外延生长于 Si 衬底, 兼容现有的 Si 基制造工艺, 降低了规模化生产的成本门槛, 加速了技术商业化进程。2016 年德州仪器推出 GaN HEMT 驱动封装方案^[6], 加速其在工业与消费级电源市场的落地; 2024 年 ROHM 与台积电合作开发面向汽车应用的大规模 GaN 功率 IC, 标志着 GaN 器件从消费、工业领域正式进

入高压车规级应用新阶段, 完成了“低压射频→中压功率→高压车规”的全场景覆盖^[7]. 2025年为满足大型 AI 模型与高性能计算对供电系统的更高需求, 英诺赛科与 AI 科技巨头英伟达展开合作, 依托英诺赛科第三代 GaN 器件提供的全链路供电解决方案, 共同推动 800 V DC 电源架构在 AI 数据中心大规模落地, 助力实现 AI 算力的大幅提升与高效、可靠、绿色的计算新时代^[8].

本文第 2 节将聚焦 GaN 功率集成技术的底层技术架构, 系统阐述平台构建的关键支撑体系; 第 3 节将围绕 GaN 单片集成的实际落地场景, 展开包括驱动电路、半桥电路、电压基准、欠压保护、过温过流保护等核心应用模块的设计与性能分析; 第 4 节是文章总结讨论与未来研究展望.

2 氮化镓基功率集成平台

2.1 横向结构的氮化镓单片集成解决方案

目前, GaN HEMT 横向结构从实现 E-mode 的技术路线上分类存在 3 种代表性的器件结构, p-GaN 栅极高电子迁移率晶体管 (p-GaN gate HEMT) 由于结构相对简单, 现已成功实现商业化, 广泛应用于中低压领域. 该类器件利用 p 型 GaN 层耗尽下方二维电子气形成 E-Mode 器件, 具备良好的栅极控制能力和较高的导通电流, 但其栅极可靠性仍面临挑战. 目前, 产业界通常使用气体刻蚀的方法制备该类器件, 这将不可避免地引入界面损伤, 从而影响器件性能与可靠性^[9]. 日本的中村修二团队^[10]在 1992 年首次通过实验系统提出 GaN 中氢钝化工艺的核心机制, 即 NH_3 解离产生的氢原子会与 p 型 GaN 中的 Mg 受主形成中性复合物造成空穴补偿, 还确立了 N_2 氛围高温退火去氢激活 p 型 GaN 的氢等离子体钝化工艺. 在此基础上, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所将这项技术推广到 p-GaN HEMT 制造中, 联合西交利物浦大学课题组报道了使用氢等离子体钝化法替代气体刻蚀法制备 p-GaN HEMT, 实现了更高的击穿电压和阈值稳定性的同时, 降低了器件的电流崩塌效应^[11].

金属-绝缘层-半导体结构 HEMT (MIS-HEMT) 通过引入绝缘介质层 (如 SiN_x 、 Al_2O_3) 有效抑制了栅极漏电流, 显著提高了栅极耐压, 使其更适合高压和高可靠性应用场景^[12]. 另外, 基于 MIS-HEMT

的三栅结构 (tri-gate HEMT) 通过多维栅极调控沟道电势分布, 不仅增强了栅极控制能力、降低了短沟道效应, 还实现了阈值电压的可调控性, 成为 GaN 功率集成电路性能突破的新兴助力^[13].

GaN 功率集成电路平台不仅支持 E-mode 和耗尽型 (D-mode) HEMT, 还能在同一外延与工艺体系下实现多种有源与无源器件, 从而构建完整的单片 GaN 集成系统. 如图 2 所示, 除了上述 E-mode HEMT, D-mode HEMT 器件以外, 肖特基势垒二极管 (Schottky barrier diode, SBD)、2DEG 电阻器、MIM (metal-insulator-metal) 电容器都是实现 IC 功能的重要组件, 均可通过相似的结构与 GaN HEMT 实现单片集成^[14,15]. 近年来, GaN 基 P 沟道器件成为行业热点, Zheng 等^[16,17]提出了多种实现氮化镓基 P 沟道器件及提升性能表现的技术, 例如氧等离子体处理、AlN 插层、自对准栅结构, 以及极化增强受主电离机制等. 这些技术显著改善了 GaN p-FET 的开启特性与电流密度, 使 GaN 基互补逻辑 (CL) 的单片集成成为可能.

2.2 氮化镓集成技术路线

数字或逻辑电路是门驱动器和其他功能子电路的重要组成部分. 本文将以最常用的反相器 (非门) 电路为例, 讨论不同技术路线之间的区别. 一般来说, 反相器由上拉和下拉器件构成. 如图 3 所示, 电阻-晶体管逻辑 (RTL) 的反相器将电阻器作为上拉器件, N 沟道的 E-Mode 器件则用于下拉. 直接耦合 FET 逻辑中, 上拉器件被替换为栅-源短路的 D-Mode HEMT. 然而, 由于 RTL 与直接耦合场效应逻辑 (DCFL) 反相器中的上拉器件配置, 在输出逻辑低电平时将会有较高的静态功耗. 上述的静态功耗存在于每个逻辑门中, 随着电路规模提升, 总静态功耗将不可忽视. 一种解决方案是使用伪互补 FET 逻辑 (PCFL), 该反相器由两个相同的路径组成, 每个路径都包含一个上拉和下拉器件, 这在 TTL 电路中通常被称为推挽或图腾柱级. 与 CMOS 类似, PCFL 仅存在由泄漏电流和短路电流引起的静态损耗. 然而, PCFL 反相器的逻辑高电压输出仅能达到 $V_{OH} = V_{DD} - V_{TH,E}$, 这将大大增加逻辑低到高的传输延迟. 与 RTL 和 DCFL 相比, CL 可大幅降低电路的静态损耗, 且能实现“轨到轨”输出, 是目前行业研究的重点, 但因其空穴迁移率低, 与 N 沟道器件存在较大失配, 尚未走入产业应用.

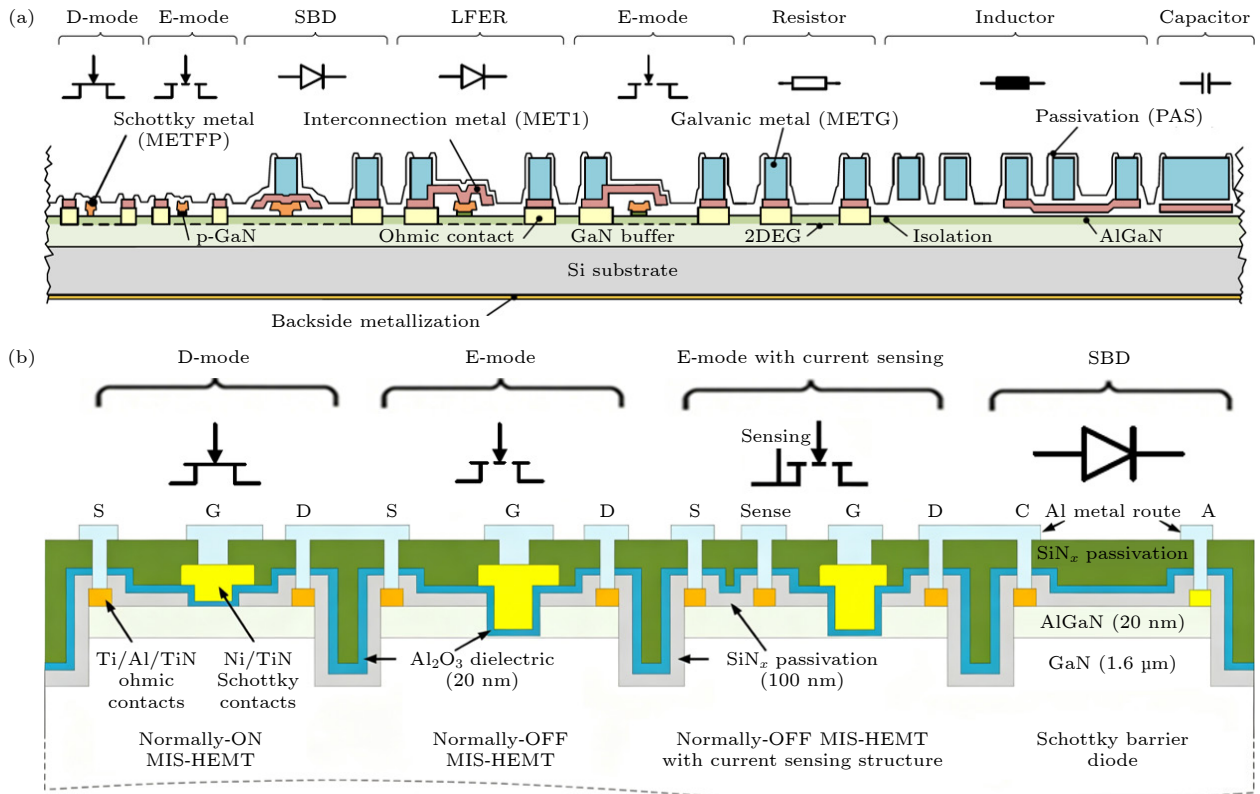


图 2 基于 GaN 横向器件的单片集成平台结构示意图 (a) p-GaN gate HEMT^[14]; (b) MIS-HEMT^[15]

Fig. 2. Schematic of monolithic integration platform based on GaN lateral devices: (a) p-GaN gate HEMT^[14]; (b) MIS-HEMT^[15].

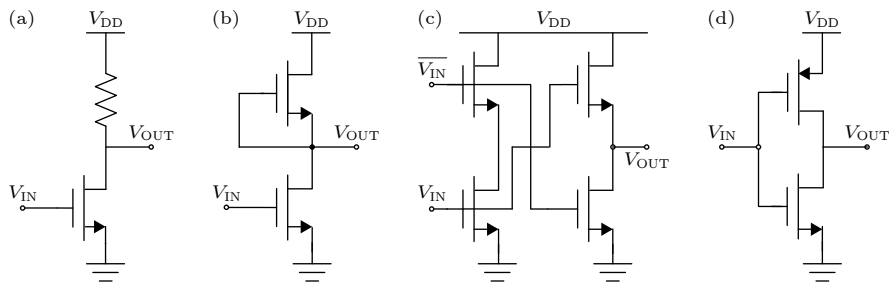


图 3 采用不同集成路线的 GaN 反相器拓扑 (a) RTL; (b) DCFL; (c) PCFL; (d) CL

Fig. 3. Topologies of GaN inverters using different integration schemes: (a) RTL; (b) DCFL; (c) PCFL; (d) CL.

2.3 氮化镓横向双向开关

在需要双向导通和阻断能力的交流 (AC) 电源转换应用中, GaN 双向开关 (BDS) 的研究备受关注. 传统的双向开关通常采用分立器件方案 (如两个反并联的 IGBT 和两个阻断二极管), 这不仅增加了器件数量, 还导致了寄生参数增大、电流路径变长以及导通损耗增大. 为了克服这些缺点, 基于横向结构的 GaN 单片集成双向开关技术应运而生, 旨在通过单芯片集成最小化尺寸并提升系统效率. 根据器件结构和集成方式, 横向 GaN 单片双向开关主要分为 3 类: 二极管桥嵌入式结构、反并联结构与双栅极结构^[18]. 其中, 二极管桥嵌入式结

构由一个 GaN HEMT 嵌入在 4 个 SBD 组成的桥式电路构成. 其中嵌入式的 GaN HEMT 可分别使用 MIS-HEMT^[19] 和 p-GaN HEMT^[20] 来实现. 这种拓扑的优势在于仅需一个器件的栅极控制信号即可实现双向开关, 简化了驱动设计. 然而, 由于电流路径中包含两个二极管, 导致导通压降较高 (通常 >1 V), 从而增大了导通损耗; 反并联结构利用具有反向阻断 (RB) 或反向导通 (RC) 能力的 GaN HEMT 反并联组成. 其中, RB-HEMT 由两个 GaN HEMT 与两个二极管器件 (通常为 SBD) 组成, 通过两路不同的栅极信号控制即可实现双向导通. 该方案的研究重点在于增强反向阻断能力^[21,22].

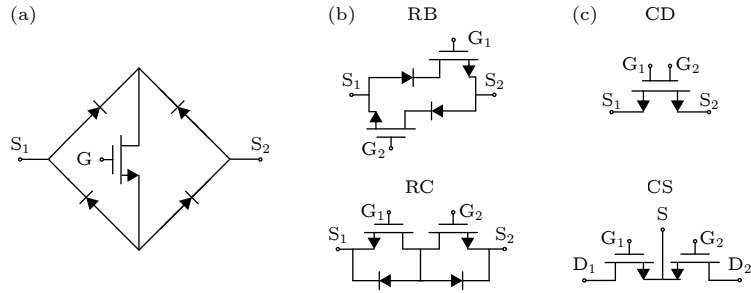


图 4 GaN 基横向双向开关拓扑示意图 (a) 二极管桥嵌入式; (b) 反并联式; (c) 双栅式

Fig. 4. Schematic of GaN-based lateral bidirectional switch topologies: (a) Diode bridge embedded; (b) anti-parallel; (c) dual-gate.

然而, 虽然 RC-HEMT 可以通过集成 SBD 来优化反向导通特性, 但这种背靠背的结构本质上仍需两个器件串联工作, 导致开启电压较高 (如 4.1 V). 在此基础上延伸出的 RC-HEMT 是一种利用反向传导机制的双向开关架构. 该结构相当于一个 HEMT 与一个反向导通的 SBD 并联, 完整的双向开关功能包括两个此类器件的反向串联连接, 并采用与反向阻断结构不同的栅极控制方案 [23].

与前两种类型的双向开关不同, 双栅极结构的双向开关由具有双栅极结构的单个器件构成, 可用单个器件实现双向开关. 双栅极结构是目前最受学术界关注的单器件双向开关解决方案, 通过在同一漂移区上集成两个栅极实现双向控制. 常见的结构包括共漏极 (common drain, CD) 和共源极 (common source, CS) 结构. 其中, 共漏极型 GaN 双向开关器件正向与反向工作共用一个漂移区, 理论上可以将比导通电阻降低至共源极型 GaN 双向开关器件的 1/4, 因此成为近年来的研究重点. 共漏极型 GaN 双向开关器件面临的主要挑战在于浮空衬底导致的衬偏效应造成器件动态电阻的严重退化. Uemoto 等 [24] 首先提出了使用 p-GaN GIT 技术开发双向开关的方法. Guo 等 [25] 通过将双结终端扩展与 p-GaN 盖层堆叠在一起, 展示了高达 3.3 kV 的击穿电压. Chang 等 [26] 提出通过 Virtual body 技术消除浮空衬底的衬偏效应, 实现了高稳定性的 650 V GaN-on-Si 双向器件. 此外, Xu 等 [27] 报道了一种具有集成式栅极驱动的共漏极双向开关, 可实现 ± 310 V, 1 MHz 的动态开关, 该研究还探索了 GaN 基双向开关在 250 °C 高温下的工作情况, 仍保持完整的对称双向导通 (>1.2 A)、高压阻断 (>900 V) 能力, 且在 1 MHz 高频、 ± 311 V 高压的 AC 斩波应用中验证了实用性, 为高温极端环境下的高频率、高功率密度电力

转换系统提供了器件基础. 如图 4 所示, 共源极结构为五端结构, 适合特定转换器应用 [28].

3 氮化镓单片集成应用

基于上述的功率集成平台, GaN 单片 IC 可根据应用需要构建多种拓扑, 以实现对应功能. 目前学术与产业界较为关注的功能模块包括单管驱动、集成式半桥、电压基准、欠压锁定电路、过温与过流保护电路等. 本节将分小节介绍上述模块的主要拓扑与性能表现.

3.1 单管驱动

为了充分发挥 GaN 器件高频开关的特性优势, 实现电源管理系统的小型化、提升动态响应速度并改善输出质量, 高性能的栅极驱动器不可或缺. 然而, 传统的分立式 GaN 栅极驱动电路的开关速度存在限制. 高频下合封引线会引发一系列问题, 例如振铃、误导通现象 [29,30]. 为此, 将栅极驱动器与 GaN 功率器件进行单片集成是一种有效方案. 该方式能够显著减少驱动路径中的寄生电感, 提升系统在高频工况下的稳定性与可靠性 [31,32]. 常见的集成式 GaN 栅极驱动电路拓扑如表 1 所示. 其基本结构由两级反相器 (DCFL 或 RTL) 和推挽缓冲级组成. 实现理想高低电平输出 (“轨到轨”) 是驱动器设计的重要目标, 由于该基本结构使用单一 V_{DD} 电源为驱动器供电, 所能达到的驱动输出电压仅能达到 $V_{OH} = V_{DD} - V_{TH,E}$. 一种直接的解决方式是提供一个额外的 V_{DD+} 电源, 但这种方法会导致栅极过压并影响器件可靠性. 另一种常见的方法是通过自举电路生成 V_{DD+} , 通常用于驱动电路的最后一级 [33]. 第 3 种方案是采用电荷泵电路, 多用于驱动电路的第 1 级反相器后 [34-37].

表 1 GaN 栅极驱动器基本拓扑
Table 1. Basic topologies of GaN gate drivers.

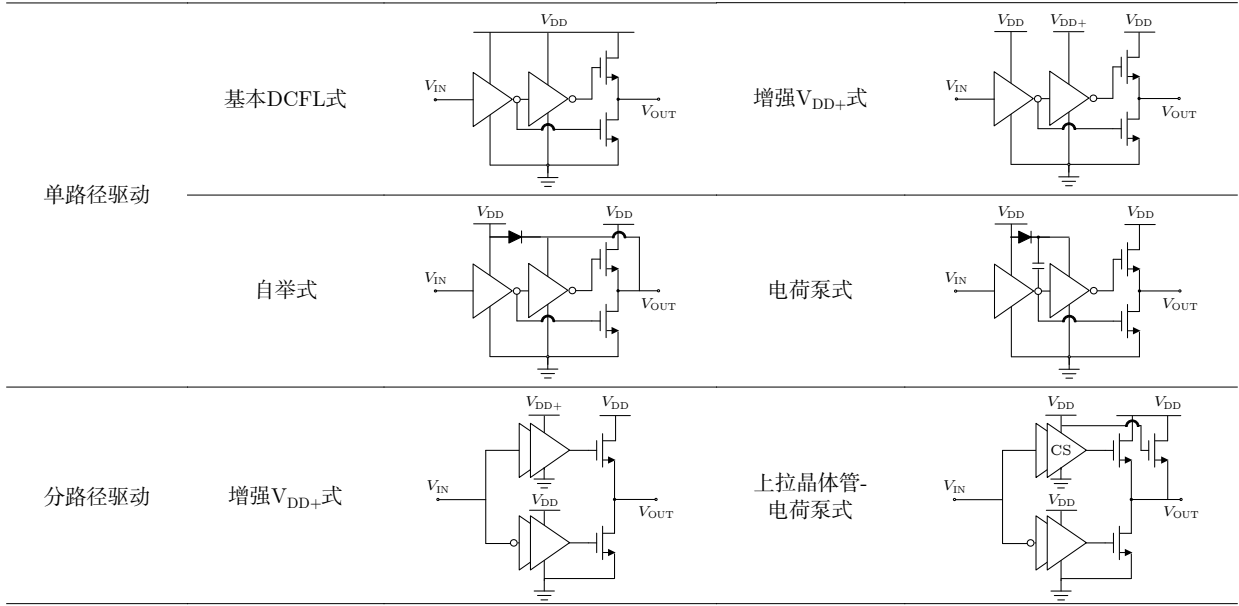


表 2 驱动器性能对比基准
Table 2. Performance benchmark of different topologies of GaN drivers.

驱动器拓扑	工艺平台	上升时间/ns	下降时间/ns	传播延迟/ns	供电电压/V	功耗/mW	
基本DCFL结构 ^[9]	H-treated p-GaN HEMT	64	65*	—	10	—	
单路径驱动器	自举式 ^[34]	p-GaN HEMTs	2.8	2*	—	6	21
	电荷泵式 ^[35]	p-GaN HEMT	26	25	29	6	—
	额外V _{DD+} ^[33]	p-GaN HEMT	3.5	2.7	8.8/6.4	11	30
分路径驱动器	上拉晶体管-电荷泵 ^[40]	p-GaN HEMT	24*	12*	—	—	—

注: *为推测值.

在单路径驱动结构中, 由于推挽级由同一信号源控制, 可能会出现交叉导通的问题. 为避免这种现象, 可以采用分路径架构, 通过插入非重叠信号, 使两个路径被独立控制. 其高侧上拉晶体管栅极可使用额外的 V_{DD+} 电源^[38,39] 或者引入额外的上拉晶体管^[34,36]. 引入额外的上拉晶体管的栅极仍需要等效 V_{DD+} 的电压来实现“轨到轨”输出, 其产生方法可使用自举或电荷泵^[40]. 表 2 总结并对比了文献中不同结构的关键性能指标, 包括上升沿时间、下降沿时间以及传播延迟. 上述方案均实现了驱动器的轨到轨输出, 从而显著提升了对功率器件的驱动能力与系统效率.

3.2 集成式半桥

半桥电路模块主要由高侧 (HS) 晶体管和低侧 (LS) 晶体管组成, 广泛应用于电源系统^[31]. 其典型应用是实现同步 DC-DC 降压转换. 增强型

GaN HEMT 的引入可使这种经典电路结构在高频高温的应用场景仍能保持输出的稳定, 同时减少芯片尺寸与寄生电感, 降低电路工作时的震荡和过冲效应^[41]. 与此同时, 将功率 GaN HEMT 与驱动控制器单片集成化的半桥 IC 能够有效减少器件在高转换频率下的开关损耗^[42,43]. 然而, GaN 集成式半桥 IC 电路仍面临着许多挑战, 其中衬底串扰效应成为了亟待突破的难题^[6]. 由于单片集成的 GaN HEMT 共用同一片衬底, 源极与衬底的直连会在晶体管开关工作的过程中导致动态电阻值的上升^[31,42,44]. 针对这一难题, 早期的方法主要分为两种. 其一, 如图 5(a), 其通过在 HS 与 LS 之间使用硅氧化物作为隔离形成 GaN-on-SOI, 使单片上的 HS 与 LS 晶体管分离^[45,51-54]. 其二, 如图 5(b), 则是将硅衬底通过掺杂形成 P-N 结, 以实现晶体管衬底之间的隔离^[46,55-58]. 近年来, 有研究采用局部刻蚀 p 型硅衬底并填充介质层的方法 (如图 5(c)), 在 LS 晶体管一侧形成隔离结构, 从而有效减缓了

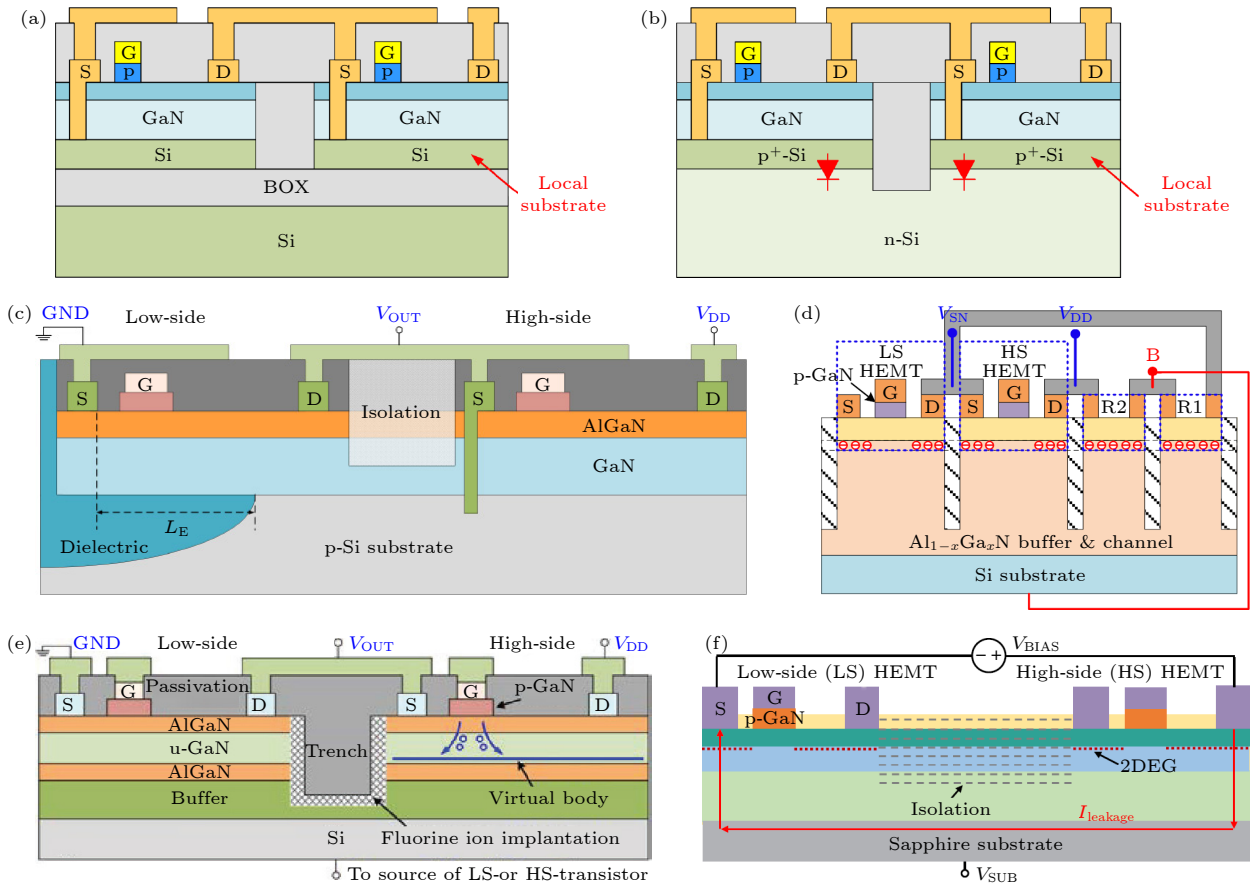


图 5 衬底串扰的抑制方法示意图 (a) 介质隔离法^[45]; (b) P-N 结隔离法^[46]; (c) 局部衬底去除法^[47]; (d) 2DEG 电阻器动态抑制法^[48]; (e) 虚拟体抑制法^[49]; (f) 蓝宝石衬底法^[50]

Fig. 5. Schematic of substrate crosstalk suppression methods: (a) Trench isolation^[45]; (b) P-N junction isolation^[46]; (c) local Si lateral etch^[47]; (d) 2DEG resistor dynamic suppression^[48]; (e) virtual-body p-GaN gate HEMT^[49]; (f) GaN-on-sapphire substrate^[50].

动态电阻的上升趋势^[47]. 另一类方法通过引入二维电子气电阻器动态调制衬底电位 (如图 5(d)), 在实现串扰抑制的同时也降低了工艺复杂度^[48]. 此外, 有研究提出采用 AlGaIn/GaN/AlGaIn 的结构并通过壕沟将 HS 与 LS 进行分离 (如图 5(e)), 使 p-GaN 栅极注入的空穴扩散至 GaN/AlGaIn 界面形成虚拟体 (virtual-body), 以此抑制衬底耦合和动态电阻的增大^[49]. 此外, 有研究提出将衬底替换成绝缘材料 (例如蓝宝石), 从而解决衬底串扰的问题^[50]. 如图 5(f) 所示, 蓝宝石衬底材料在高温、高压条件下的串扰效应测试中, 表现出比在传统硅衬底更高的击穿电压与更小的电流退化率, 近期文献^[50,59,60]中报道了 1.2 kV 及 3 kV GaN-on-Sapphire 集成技术.

3.3 电压基准

电压基准电路是一种能够提供稳定、精确且不随温度、电源电压及负载变化而波动的直流电压的

电路. 随着 GaN 功率芯片集成度的提高, 基于 GaN HEMT 平台, 且能实现高耐压、低温漂、高抗扰的电压基准模块尤为重要^[61,62]. 目前 GaN 基电压基准电路的 3 种主要的拓扑如图 6 所示.

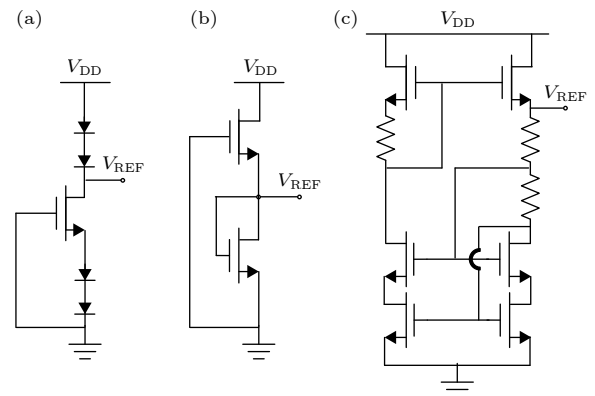


图 6 GaN 参考电压电路拓扑图 (a) 基于 SBD^[63]; (b) 双晶体管^[64]; (c) 宽摆幅电流镜^[65]

Fig. 6. Topologies of GaN voltage reference circuits: (a) SBD-based^[63]; (b) dual-transistor^[64]; (c) wide-swing current mirror^[65].

基于 SBD 的电压基准结构是 GaN 技术中实现电压基准的重要方案之一. 该结构的典型拓扑如图 6(a) 所示, 采用工作在亚阈值区的 D-Mode HEMT 作为恒流源, 串联 4 个肖特基二极管. 其中两个二极管用于产生参考电压, 另外两个则通过源退化结构实现对温度与工艺波动的补偿^[63]. 第 2 种方案为双晶体管 (2T) 电压基准结构, 如图 6(b) 所示. 该结构由一个 D-Mode 和一个 E-Mode GaN HEMT 串联构成, D-mode 器件作为恒流源, E-mode 器件为二极管接法, 基准电压从两晶体管之间的节点输出. 通过合理匹配两种器件的阈值电压温度系数, 可实现较低的温度漂移^[64]. 此外, 基于宽摆幅电流镜的电压基准结构如图 6(c) 所示, 由一对宽摆幅匹配电流镜与分支电阻网络构成. 该结构的参考电压输出来源于电流镜输出支路的源极电压, 通过合理选取电阻比例, 可实现较好的温度系数^[65]. 上述 3 种结构代表了 GaN 基电压基准电路的基础拓扑方案. 近年来, 基于上述基础拓扑的改进工作通过引入多级结构^[62]、PTAT 栅极电流补偿^[66]与线性度优化^[67]等技术, 进一步提升了电路性能. 3 种 GaN 基电压基准电路的性能对比如表 3 所示.

表 3 3 种 GaN 参考电压电路的性能比较
Table 3. Performance comparison of three GaN voltage reference circuits.

性能指标	基于SBD ^[63]	双晶体管 ^[64]	宽摆幅电流镜 ^[65]
适用供电范围/V	3—20	4.8—50	3.9—24
温度系数/(10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)	70	34	23.6
典型功耗/ μ W	<1	0.3—2	9.5
线性敏感度/(%·V ⁻¹)	0.3—1	0.06—0.08	0.32
PSRR (dB@100 Hz)	—	42.8	-45
启动响应/ μ s	—	0.4—0.8	—
芯片面积/mm ²	0.12	0.10	0.52

3.4 欠压锁定

在 GaN 功率系统中, 若驱动电路的供电电压过低, 将导致后级功率晶体管无法完全开启, 从而显著增加导通损耗. 欠压锁定 (UVLO) 是功率转换系统中至关重要的保护功能. 当检测到 V_{DD} 低于设定阈值时, 及时关闭栅极驱动器, 避免系统在低压条件下非正常工作^[68]. 此外, UVLO 电路需具有迟滞效应, 有效防止轻微扰动导致的误触发^[69,70].

由于 GaN 器件的阈值电压较低且栅极耐压裕度较小, 因此对供电电压的波动更为敏感^[31]. 基于 GaN 平台实现的 UVLO 电路单片集成, 是应对 GaN 功率器件在低供电电压下可靠性挑战、提升系统稳定性的有效方案^[35].

UVLO 电路通常由电阻阶梯、比较器、反相器和迟滞生成器构成 (见图 7)^[62]. 通过电阻阶梯对电源电压进行分压采样, 得到的采样电压与内部参考电压进行比较, 进而控制反相器的输出状态. 此外, 由晶体管构成的反馈回路使得在 V_{DD} 的不同变化方向时改变比较器的参考电压, 从而实现迟滞功能. 然而, 该结构易受阈值电压波动影响, 导致 UVLO 开启和关闭的阈值发生偏移, 使整体电路性能稳定性受到限制. 为提升 UVLO 电路在 GaN 平台中的抗波动性能, Bau 等^[70]提出一种集成主动负载栅控制的新型结构. 该电路通过上拉及偏置网络, 使其可以自适应调整导通状态, 从而稳定工作点并抑制阈值电压漂移. 此外, Yan 和 Ma^[37]提出了一种自举混合型栅极驱动器, 其在电路结构上融合了 UVLO 功能. 该驱动器通过自举电容、电平转换和多晶体管协同控制实现工作状态自适应切换.

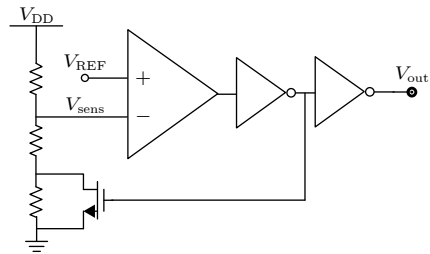


图 7 GaN UVLO 模块的常规电路结构示意图^[35]
Fig. 7. Schematic of the GaN UVLO module^[35].

3.5 过温保护

氮化镓功率器件在高压、高频的开关操作产生的热量将导致结温急剧上升, 不仅引发载流子迁移率下降、阈值电压漂移等性能退化, 还会加速器件老化甚至热击穿, 严重影响系统的可靠性. 因此, 实现准确、快速的原位温度监测与过温保护, 有利于提升氮化镓功率集成电路的安全运行与寿命.

如图 8(a) 所示, Li 等^[71]提出了一种基于四晶体管 (4T) 的温度传感器, 结合电压基准源与逻辑反相器的电路设计, 通过调节 D-mode 与 E-mode 器件尺寸比例, 在 25—250 °C 范围内实现了温度

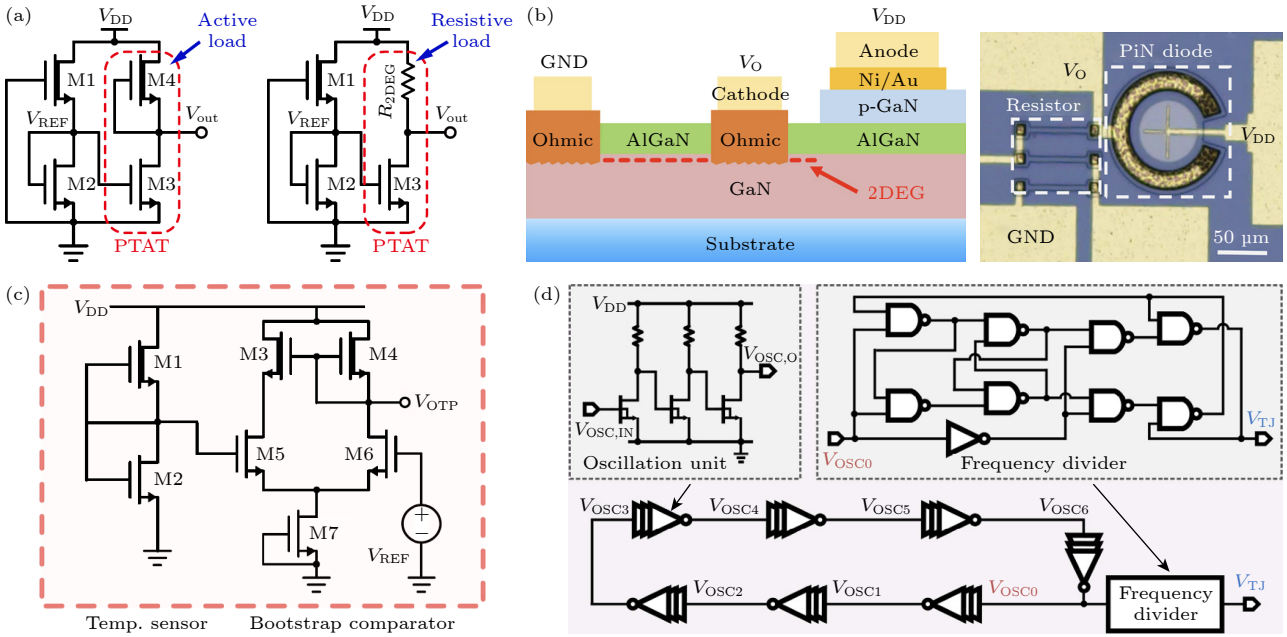


图 8 (a) 四晶体管温度传感器^[71]; (b) 基于 2DEG 电阻与 SBD 的温度传感器^[72]; (c) 基于二晶体管的 OTP 模块^[73]; (d) 基于环形振荡器分频器的 OTP 模块^[37]
 Fig. 8. (a) Four-transistor temperature sensor^[71]; (b) temperature sensor based on 2DEG resistor and SBD^[72]; (c) two-transistor-based OTP module^[73]; (d) OTP module based on ring oscillator divider^[37].

传感高灵敏度. 此外, 当使用 2DEG 电阻替代后级反相器的有源负载时, 其灵敏度和线性度进一步提高, 且对工艺-电压-温度 (PVT) 波动具有更强鲁棒性. 如图 8(c) 所示, Li 等^[73] 进一步提出精简的电路拓扑, 通过调节 D-mode 与 E-mode 的尺寸比例, 可在同一结构中实现比例于绝对温度 (PTAT) 或互补于绝对温度 (CTAT) 的输出, 表现出优异的抗电源干扰特性. 集成了该结构过温保护 (OTP) 模块可实现快速响应, 可直接应用于功率转换系统实现实时高速保护和状态自适应切换. 如图 8(b) 所示, Chang 等^[72] 提出一种基于 p-GaN/AlGaIn/GaN 异质结构的温度传感器, 通过串联 2DEG 电阻与 SBD, 利用二者相反的温度特性, 实现了高灵敏度, 适用于超宽温度范围. 此外, Yan 和 Ma^[37] 提出一种由环形振荡器分频器组成的过温保护电路, 如图 8(d) 所示. 振荡器内部包含多个级联的反相单元, 每个单元由三级 RTL 反相器级联构成. 其振荡频率受器件温度系数调制, 可准确反映芯片结温. 分频器对振荡信号进行分频处理, 扩展了频率范围以提高响应速度.

3.6 过流保护

在 GaN 功率系统中, 外部负载的突变可能引

发大电流, 导致晶体管过热甚至损坏. 研究表明, 在 400 V 和 30 A 饱和电流的条件下, GaN 器件仅能承受约 400 ns 的瞬态过流事件, 否则将造成不可逆的损伤^[35]. 近年来, Bisi 等^[74] 与 Lao 等^[75] 分别提出局部栅极去除与源极电流钳位, 实现了较高的器件过流保护能力, 然而这些方法不可避免地造成器件导通电阻增大. 因此, 在驱动电路中集成过流保护模块, 以实现电流异常的快速检测及在异常工况下的安全关断, 对于提升系统可靠性、保护其他组件并维持系统稳定性至关重要.

串联电阻电流传感器是一种经典方案, 其通过在功率晶体管回路中串联一个精密小电阻来检测过流. 该方法虽简单, 但会引入额外的功率损耗和电路电感, 限制了系统的工作频率与性能^[70]. 如图 9(a) 所示, Jiang 等^[38] 提出采用与功率晶体管结构相似的嵌入式 Sense-HEMT 来检测与主功率管电流成比例的感应电流. 该方法基于二者在相同栅-源电压和漏-源电压下, 漏极电流与其导通电阻成反比的原理, 通过一个已知的电流感应比实现检测. 然而, 功率器件的温度特性可能导致电流比例失配, 且 Sense-HEMT 的小尺寸使其易受工艺波动影响, 从而降低检测精度. 如图 9(b) 所示, Sun 等^[76] 在栅极和源极之间增设一个感应极用于漏极电流检

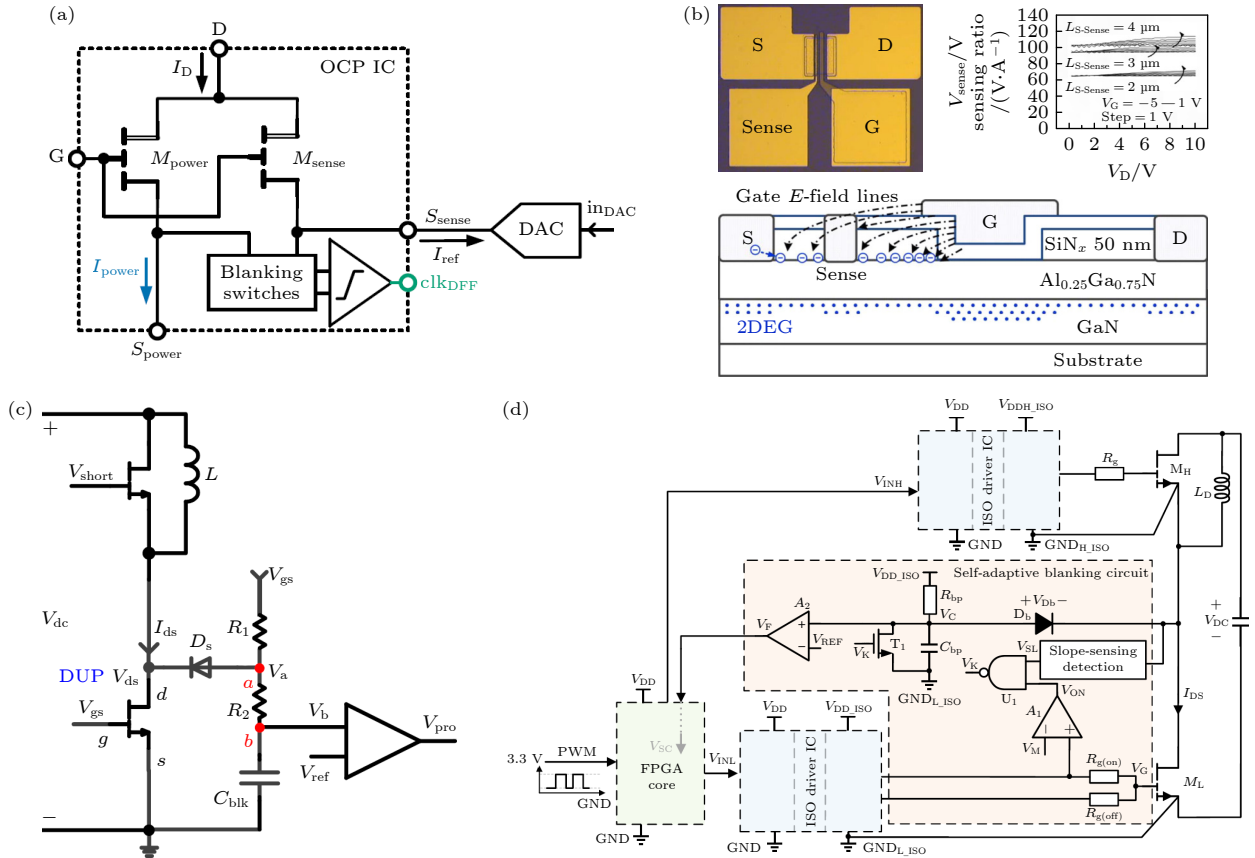


图 9 (a) 嵌入式 Sense-HEMT 电流传感^[38]; (b) 副栅法电流传感^[76]; (c) 传统去饱和和法电流传感^[77]; (d) 去饱和和法 OTP 模块^[78]
 Fig. 9. (a) Embedded Sense-HEMT current sensing^[38]; (b) sub-gate current sensing^[76]; (c) desaturation current sensing^[77]; (d) desaturation OTP module^[78].

测. 其感应比由源极的欧姆接触电阻和源极与感应极之间的 2DEG 电阻决定, 在稳态、瞬态和高温下均表现稳定. 然而, 当温度超过 160 °C 时, 检测信号会开始偏离实际电流.

如图 9(c) 所示, 基于去饱和和检测的过流保护方法是目前工业界应用最广泛的方案之一, 其通过持续监测功率器件导通期间的漏源电压并与预设参考阈值进行比较以实现故障判断, 可靠性高但可能存在开关瞬态误触发问题^[77]. 如图 9(d) 所示, 在此基础上, 引入自适应消隐时间模块的过流保护方法通过实时监测漏源电压变化率动态辨识功率器件的开关状态与导通进程, 并智能生成可变的消隐时间窗口, 仅在器件完全进入导通稳态后才激活漏源电压监控功能, 从而在根源上避免了开关瞬态的误触发, 提升了保护的准确性与适应性^[78].

4 结 论

GaN 作为第三代宽禁带半导体的核心材料, 凭借高临界击穿电场、高电子饱和速度、优异的高

温稳定性及异质结二维电子气的高迁移率特性, 成为突破传统硅基功率器件性能瓶颈、适配高频、高温、高功率密度电源转换需求的核心解决方案, 在新能源汽车、航空航天、数据中心等领域展现出不可替代的应用价值. 此外, 单片集成技术的快速发展推动了驱动、半桥、电压基准及过温、过流、欠压锁定等保护功能模块的一体化集成, 有效降低了系统寄生参数, 提升了 GaN 功率系统的集成度、可靠性与功率密度, 为其工程化落地奠定了坚实的技术基础.

目前, GaN 功率集成技术在电路与系统层面的工程化应用仍面临诸多关键挑战, 其中衬底串扰是 GaN 单片集成亟待解决的重要问题, 直接导致集成器件动态导通电阻退化, 从而影响半桥电路等核心模块的工作稳定性; 此外系统级的热管理、多功能模块单片集成带来的寄生参数调控、极端工况下的鲁棒性等问题, 也是制约 GaN 功率集成技术在高端应用场景落地的关键因素.

未来, GaN 功率集成领域的研究需紧密围绕工程化应用需求, 以解决实际技术瓶颈为核心导

向, 重点开展多物理效应协同建模、高性能衬底隔离技术创新、系统级集成架构优化等方向的研究; 同时, 需结合新能源汽车、航空航天等具体应用场景的工况要求, 开展定制化的集成设计与可靠性验证, 推动衬底隔离、热管理、模块匹配等关键技术的协同突破. 通过上述研究的持续推进, 进一步释放 GaN 材料的性能优势, 实现 GaN 功率集成电路在更广泛领域的工程化应用, 最终构建更高效率、更小体积、更强鲁棒性的下一代电源管理系统, 为功率电子技术的升级与高端装备的发展提供核心支撑.

参考文献

- [1] Mitani E, Haematsu H, Yokogawa S, Nikaido J, Tateno Y 2006 *CS Mantech Conference* Vancouver, British Columbia, Canada, April 24–27, 2006 p183
- [2] Ma Y P 2019 *EPC GaN Transistor Application Readiness: Phase One Testing Efficient Power Conversion Corporation Technical Report*
- [3] Huang X C, Liu Z Y, Li Q, Lee F C 2014 *IEEE Trans. Power Electron.* **29** 2453
- [4] Perkins S, Arvanitopoulos A, Gyftakis K N, Lophitis N 2018 *1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia)* Xi'an, China, May 16–18, 2018 p174
- [5] Zhou D C, Chiu H C, Zhang J, Wong R K Y, Zhao T, Zhang F, Zhang M, Zou Y B, Chen L 2020 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* New Orleans, LA, USA, March 15–19, 2020 p636
- [6] Jones E A, Wang F F, Costinett D 2016 *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.* **4** 707
- [7] https://www.rohm.com.cn/news-detail?news-title=2024-12-10_news&defaultGroupId=false [2024-12-10]
- [8] <https://www.innoscience.com/cn/news/detail/85/1297> [2024-03-18]
- [9] Li F, Li A, Wang Y B, Zhu Y H, Yu C R Y, Ding C M R, Wu S Q, Liu W, Yu G H, Gao X T, Wang Z M, Zhang B S 2023 *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Hong Kong, China, May 28–June 01, 2023 p99
- [10] Nakamura S, Iwasa N, Senoh M, Mukai T 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 1258
- [11] Li F 2024 *Ph. D. Dissertation* (Liverpool, United Kingdom: University of Liverpool)
- [12] Li A 2024 *Ph. D. Dissertation* (Liverpool, United Kingdom: University of Liverpool)
- [13] Li A, Wang W S, Li F, Zhu Y H, Zhang Y L, Liu W, Yu G H, Zeng Z M, Zhang B S 2024 *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Bremen, Germany, June 02–06, 2024 p1
- [14] Basler M 2022 *Ph. D. Dissertation* (Breisgau, Germany: University of Freiburg)
- [15] Sun R, Liang Y C, Yeo Y C, Zhao C, Chen W, Zhang B 2019 *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Shanghai, China, May 19–23, 2019 p271
- [16] Zheng Z Y, Song W J, Zhang L, Yang S, Wei J, Chen K J 2021 *IEEE Electron Device Lett.* **42** 26
- [17] Zhang X M, Zhang Y L, Duan J C, Sun Z W, Wang W S, Liang Y, Yang X L, Zhang L S, Chen Z H, Zhang J, Low K L, Liu W 2025 *IEEE Trans. Electron Devices* **72** 312
- [18] Wu S Q, Li F, Li A, Zhu Y H, Fan R, Yan J, Wen H Q, Pei Y, Liu W 2025 *IEEE Electron Devices Rev.* **2** 176
- [19] Wang H Y, Mao W, Yang C, Zhao S L, Du M, Wang X F, Zheng X F, Wang C, Zhang C F, Zhang J C 2021 *Appl. Phys. Express* **14** 096502
- [20] Park B R, Han S W, Cha H Y 2015 *IEEE Electron Device Lett.* **36** 324
- [21] Sun R Z, Wang F Z, Luo P, Xu W J, Wang Y, Liu C, Chen W J, Zhang B 2022 *IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Vancouver, BC, Canada, May 22–25, 2022 p173
- [22] Zhou C, Chen W, Piner E L, Chen K J 2010 *IEEE Electron Device Lett.* **31** 668
- [23] Shi Y J, Chen W J, Wang F Z, Liu J, Cui X T, Hu G H, Liu C, Li Z J, Zhou Q, Zhang B 2018 *J. Comput. Electron.* **17** 238
- [24] Uemoto Y, Morita T, Ikoshi A, Umeda H, Matsuo H, Shimizu J, Hikita M, Yanagihara M, Ueda T, Tanaka T, Ueda D 2007 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* Washington, DC, USA, December 10–12, 2007 p 865
- [25] Guo Y J, Qin Y, Xiao M, Porter M, Song Q H, Popa D, Efthymiou L, Cheng K, Kravchenko I, Shao L B, Wang H, Udrea F, Zhang Y H 2025 *IEEE Electron Device Lett.* **46** 556
- [26] Chang H, Yang J J, Yu J J, Lao Y H, Yin Y Y, Yang X L, Wang M J, Shen B, Chen K J, Wei J 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 213502
- [27] Xu Y S, Li A, Li F, Yu G H, Zeng Z M, Zhang B S, Gu J M, Liu W 2025 *IEEE Electron Device Lett.* **46** 1970
- [28] Leo S, Jean-Paul F, David F, Pierre-Olivier J, Pierre P, Othman L 2018 *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* Lyon, France, February 20–22, 2018 p742
- [29] Zhang S, Min R, Zhang D S, Xu H R, Liu C, Zhou Q Y, Tong Q L, Zou X C 2025 *IEEE J. Solid-State Circuits* **61** 1643
- [30] Ke X, Sankman J, Chen Y, He L, Ma D B 2017 *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC)* San Francisco, CA, USA, February 05–09, 2017 p430
- [31] Wei J, Zheng Z Y, Tang G F, Xu H, Lyu G, Zhang L, Chen J T, Hua M Y, Feng S R, Chen T, Chen K J 2024 *IEEE Trans. Electron Devices* **71** 1365
- [32] Basler M, Reiner R, Mönch S, Grieshaber D, Benkhelifa F, Quay R 2024 *IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Europe (WiPDA Europe)* Cardiff, United Kingdom, September 16–18, 2024 p1
- [33] Deneke N, Wicht B 2024 *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)* San Francisco, CA, USA, February 18–22, 2024 p514
- [34] Basler M, Deneke N, Mönch S, Reiner R, Wicht B, Quay R 2023 *IEEE Open J. Power Electron.* **4** 487
- [35] Xu H, Tang G, Wei J, Zheng Z, Chen K J 2022 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **69** 6784
- [36] Kaufmann M, Wicht B 2020 *IEEE J. Solid-State Circuits* **55** 3169
- [37] Yan D, Ma D B 2022 *IEEE J. Solid-State Circuits* **57** 3865
- [38] Jiang W L, Murray S K, Zaman M S, De Vleeschouwer H, Moens P, Roig J, Trescases O 2022 *IEEE Trans. Power Electron.* **37** 9314
- [39] Bau P, Phung T H, Delaine J, Driussi S, Beauchene T 2024 *IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Europe (WiPDA Europe)* Cardiff, United Kingdom, September 16–18, 2024 p1
- [40] Wang H Y, Xu Y S, Ding S L, Gu J M, Low K L, Li A, Liu W 2025 *China International Forum on Solid State Lighting and International Forum on Wide Bandgap Semiconductors*

- (*SSLCHINA: IFWS*) Xiamen, China, November 11–14, 2025 p315
- [41] Cui M, Sun R Z, Bu Q L, Liu W, Wen H Q, Li A, Liang Y C, Zhao C Z 2019 *IEEE Access* **7** 184375
- [42] Li X D, Van Hove M, Zhao M, Geens K, Guo W M, You S Z, Stoffels S, Lempinen V P, Sormunen J, Groeseneken G, Decoutere S 2018 *IEEE Electron Device Lett.* **39** 999
- [43] Aygun D, Fossion M, Decoutere S, Barnes A, Delepaut C, Thone J, Wens M 2022 *IEEE Applied Power Electronics and Exposition (APEC)* Houston, TX, USA, March 20–24, 2022 p2141
- [44] Croon J A, Hurkx G A M, Donkers J J T M, Sonsky J 2015 *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Hong Kong, China, May 10–14, 2015 p365
- [45] Li X D, Van Hove M, Zhao M, Geens K, Lempinen V P, Sormunen J, Groeseneken G, Decoutere S 2017 *IEEE Electron Device Lett.* **38** 918
- [46] Wei J, Zhang M, Lyu G, Chen K J 2021 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **9** 545
- [47] Yang J J, Wei J, Wang M J, Wu Y L, Nuo M Q, Hao Y L, Shen B 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 5584
- [48] Zhao M Y, Zheng Y F, Ma Y F, Sun Y, Wang D G, Pan C Q, Zhou J J, Li S, Zhang L, Liu S Y, Sun W F 2024 *IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)* Zhuhai, China, October 22–25, 2024 p1
- [49] Yang J J, Wei J, Wang M J, Nuo M Q, Yang H, Li T, Yu J J, Yang X L, Hao Y L, Wang J Y, Shen B 2023 *International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA, December 09–13, 2023 p1
- [50] Jiang J S, Jiang B M, Han Z F, Zhang Y, Zhang M D, Ren X G, Tang X, Li X D, Yang S, Zhang J C 2025 *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Kumamoto, Japan, June 01–05, 2025 p237
- [51] Cosnier T, Syshchik O, De Jaeger B, Geens K, Cingu D, Fabris E, Borga M, Vohra A, Zhao M, Bakeroot B, Wellekens D, Magnani A, Vudumula P, Chatterjee U, Langer R, Decoutere S 2021 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA, December 11–16, 2021 p5.1.1
- [52] Li X, Geens K, Guo W, You S, Zhao M, Fahle D, Odnoblyudov V, Groeseneken G, Decoutere S 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 1499
- [53] Li X, Amirifar N, Geens K, Zhao M, Guo W, Liang H, You S, Posthumus N, De Jaeger B, Stoffels S, Bakeroot B, Wellekens D, Vanhove B, Cosnier T, Langer R, Marcon D, Groeseneken G, Decoutere S 2019 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* (San Francisco, CA, USA, December 07–11, 2019 p4.4.1
- [54] Moench S, Reiner R, Waltreit P, Quay R, Ambacher O, Kallfass I 2021 *33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Nagoya, Japan, May 30–June 03, 2021 p335
- [55] Wei J, Zhang M, Lyu G, Chen K J 2020 *Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia)* Suita, Japan, September 23–25, 2020 p1
- [56] Lyu G, Wei J, Song W J, Zheng Z Y, Zhang L, Zhang J, Cheng Y, Feng S R, Ng Y H, Chen T, Zhong K L, Liu J P, Zeng R, Chen K J 2021 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA, December 11–16, 2021 p5.2.1
- [57] Lyu G, Wei J, Song W J, Zheng Z Y, Zhang L, Zhang J, Feng S R, Chen K J 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 4162
- [58] Lyu G, Wei J, Ng Y H, Cheng Y, Feng S, Chen K J 2022 *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Vancouver, BC, Canada, May 22–25, 2022 p185
- [59] Li S, Ma Y F, Lu W H, Li M F, Wang L X, Zhang Z K, Zhu T G, Li Y H, Wei J X, Zhang L, Liu S Y, Sun W F 2023 *International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA, December 09–13, 2023 p1
- [60] Yang J J, Liu S H, Yu J J, Cui J W, Chang H, Li T, Lao Y H, Yang X L, Liu X S, Wang M J, Shen B, Wei J 2025 *Symposium on VLSI Technology and Circuits* Kyoto, Japan, June 08–12, 2025 p1
- [61] Bimbi C, Pennisi S, Privitera S, Pulvirenti F 2022 *Electronics* **11** 1840
- [62] Cao P Y, Zhao K P, Xu Y H, Van Zalinge H, Lam S, Zhang P, Cui M, Xue F 2025 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **13** 630
- [63] Wong K Y, Chen W, Chen K J 2010 *IEEE Trans. Electron Devices* **57** 952
- [64] Li A, Shen Y, Li Z Q, Zhao Y C, Mitrovic I Z, Wen H Q, Lam S, Liu W 2022 *IEEE Electron Device Lett.* **43** 362
- [65] Liao C H, Yang S H, Liao M Y, Chung K C, Kumari N, Chen K H, Lin Y H, Lin S R, Tsai T Y, Juang Y Z 2020 *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)* San Francisco, CA, USA, February 16–20, 2020 p72
- [66] Chiu P J, Chen C Y, Wu X Q, Huang Y T, Wang T W, Hung S H, Chen K H, Zheng K L, Li C C 2024 *IEEE Solid-State Circuits Lett.* **7** 359
- [67] Gong R, Qiu H, Xu Y, Gu J, Li A, Liu W 2025 *China International Forum on Solid State Lighting and International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA: IFWS)* Xiamen, China, November 11–14, 2025 p328
- [68] Tang G 2018 *Ph. D. Dissertation* (Hongkong, China: The Hong Kong University of Science and Technology)
- [69] Guo W L, Du S, Bai C Q, Lei L, Zhu Y X 2018 *China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLCHINA: IFWS)* Shenzhen, China, October 23–25, 2018 p1
- [70] Bau P, Driussi S, Beauchene T 2024 *IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Europe (WiPDA Europe)* Cardiff, United Kingdom, September 16–18, 2024 p1
- [71] Li A, Shen Y, Li Z Q, Li F, Sun R Z, Mitrovic I Z, Wen H Q, Lam S, Liu W 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 333
- [72] Chang J, Yin Y L, Du J H, Wang H, Li H R, Zhao C H, Li H, Hu C G, Cao W P, Tang X, Yang S 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 594
- [73] Li A, Li F, Chen K W, Zhu Y H, Wang W S, Mitrovic I Z, Wen H Q, Liu W 2023 *IEEE Trans. Power Electron.* **38** 10584
- [74] Bisi D, Gritters J, Hosoda T, Kamiyama M, Cruse B, Huang Y L, McKay J, Gupta G, Lal R, Neufeld C, Zuk P, Wu Y F, Parikh P, Mishra U 2021 *IEEE Appl. Power Electron. Conf. and Exposition (APEC)* Phoenix, AZ, USA, June 14–17, 2021 p370
- [75] Lao Y H, Yu J J, Zheng Q, Yang J J, et al. 2026 *IEEE Trans. Electron Devices* **73** 1545
- [76] Sun R Z, Liang Y C, Yeo Y C, Zhao C Z 2017 *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 3515
- [77] Wu J, Meng W, Zhang F, Dong G, Shu J 2021 *IEEE Trans. Power Electron.* **36** 2432
- [78] Lv J H, Yang Y, Wen Y, Du X F, Zhang J Y, Li Y, Xiang W 2026 *IEEE Trans. Power Electron.* **41** 4821
- [79] Huang B, Li Y, Zheng T Q, Zhang Y 2014 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* Pittsburgh, PA, USA, September 14–18, 2014 p2844

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

Gallium nitride power integration*

XU Yunsong^{1)2)3)#} JI Haotian^{1)2)3)#} WANG Haoyu¹⁾ QIU Hengzhi¹⁾
 GONG Ruiqi¹⁾ DING Shenlei¹⁾ JIANG Yunzhou¹⁾ GU Jiangmin¹⁾²⁾³⁾
 LI Ang¹⁾²⁾³⁾ WEI Jin^{4)†} LIU Wen^{1)2)3)‡}

1) (*School of Advanced Technology, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China*)

2) (*Advanced Semiconductor Research Center, Xi'an-Jiaotong Liverpool University, Suzhou 215123, China*)

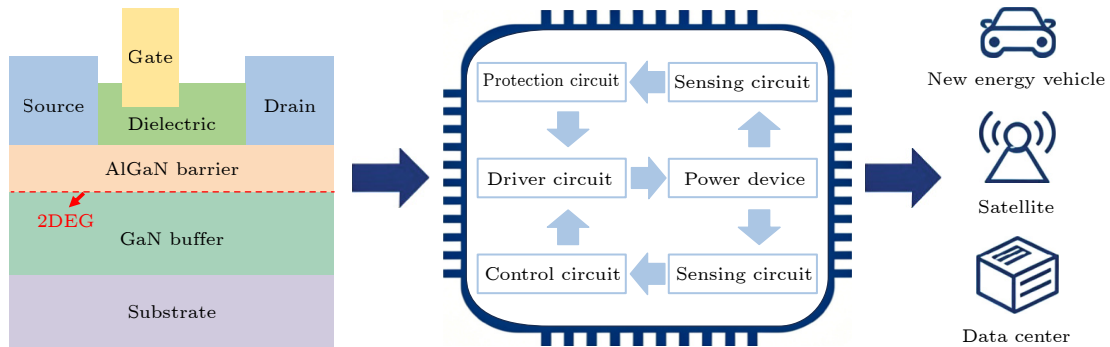
3) (*Department of Electrical Engineering and Electronics, University of Liverpool, Liverpool L69 3GL, U.K*)

4) (*Department of Integrated Micro-Nano Electronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

(Received 24 February 2026; revised manuscript received 29 March 2026)

Abstract

Gallium nitride (GaN), as a representative wide-bandgap semiconductor, has attracted extensive attention for next-generation power integrated circuits owing to its high critical electric field, high electron saturation velocity, and excellent thermal stability. This paper presents a systematic review of GaN power integration from a platform-to-application perspective. First, the material and device-level advantages of GaN for high-frequency, high-temperature, and high-power-density operation are analyzed. Then, the fundamental monolithic integration platforms based on lateral GaN high electron mobility transistors (HEMTs) are reviewed, as well as the co-integration of key functional components. On this basis, representative GaN integration routes and switching structures are presented. Furthermore, the design methodologies and performance characteristics of key application modules in monolithic GaN power ICs, including gate drivers, integrated half-bridges, voltage references, undervoltage lockout circuits, over-temperature protection, and over-current protection, are comprehensively summarized. The review indicates that GaN monolithic integration can effectively reduce parasitic effects, shorten critical switching paths, improve switching speed, and enhance system efficiency, power density, and reliability, making it highly promising for electric vehicles, aerospace electronics, data centers, and other demanding applications. Meanwhile, several critical bottlenecks remain, including substrate crosstalk, dynamic on-resistance degradation, thermal management, parasitic coupling, and robustness under extreme operating conditions. This work highlights the core technical challenges and emerging development directions of GaN power integrated circuits.



Keywords: GaN power integration, high electron mobility transistors, monolithic integrated circuit

DOI: 10.7498/aps.75.20260273

CSTR: 32037.14.aps.75.20260273

* Project supported by the Advanced Materials-National Science and Technology Major Project, China (Grant No. 2024ZD06049XX), the Suzhou Dushu Lake Science & Education Innovation District Project, China (Grant No. CJRH2024201), and the Xi'an Jiaotong-Liverpool University Research Development Fund, China (Grant No. RDF-22-01-110).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: Jin.Wei@pku.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: Wen.Liu@xjtlu.edu.cn

氮化镓功率集成

徐云松 季浩天 王浩宇 邱恒志 龚瑞琦 丁申磊 蒋昀洲 顾江敏 李昂 魏进 刘雯

Gallium nitride power integration

XU Yunsong JI Haotian WANG Haoyu QIU Hengzhi GONG Ruiqi DING Shenlei JIANG Yunzhou
GU Jiangmin LI Ang WEI Jin LIU Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080802 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260273

CSTR: 32037.14.aps.75.20260273

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260273>

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

高功率GaN 微波器件大信号缩放模型

A large-signal scaling model of high-power GaN microwave device

物理学报. 2023, 72(14): 147103 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230440>

重离子辐射对AlGaN/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 AlGaN/GaN high electron mobility transistors

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

增强型Cascode结构氮化镓功率器件的高能质子辐射效应研究

High-energy proton radiation effect of Gallium nitride power device with enhanced Cascode structure

物理学报. 2023, 72(1): 012401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221617>

基于二维材料的集成与应用

Integration and applications of two-dimensional materials

物理学报. 2026, 75(1): 012401 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251386>

图案化石墨烯/氮化镓复合超表面对太赫兹波在狄拉克点的动态多维调制

Terahertz dynamic multidimensional modulation at Dirac point based on patterned graphene/gallium nitride hybridized with metasurfaces

物理学报. 2022, 71(6): 068101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211845>

GaN基高功率微波器件高效场路协同分析方法

Efficient field-circuit co-simulation method for GaN-based high power microwave devices

物理学报. 2023, 72(14): 147101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230452>