

# 第三代半导体迎来新发展机遇

半导体材料是信息技术的核心基础材料,一代材料、一代技术、一代产业,半个多世纪来从基础技术层面支撑了信息技术翻天覆地的变化,推动了电子信息科技产业持续蓬勃发展。同样地,信息技术和电子信息科技产业发展需求又驱动了半导体材料与技术的发展。

## 1 第三代半导体材料及其应用

第三代半导体是指以 GaN、SiC 为代表的宽禁带半导体材料,它是继 20 世纪 50 年代以 Ge、Si 为代表的第一代半导体和 70 年代以 GaAs、InP 为代表的第二代半导体之后于 90 年代发展起来的新型宽禁带半导体材料,即禁带宽度明显大于 Si (1.12 eV) 和 GaAs (1.43 eV) 的半导体材料,通常界定为禁带宽度大于 2 eV 的材料。目前备受关注的有 3 类材料:(1) III 族氮化物半导体包括 GaN (3.4 eV)、InN (0.7 eV) 和 AlN (6.2 eV) 及其固溶合金材料;(2) 宽禁带 IV 族化合物的 SiC (2.4~3.1 eV) 和金刚石薄膜 (5.5 eV) 材料;(3) 宽禁带氧化物半导体包括 Zn 基氧化物半导体 (2.8~4.0 eV) 的 ZnO、Zn-MgO、ZnCdO 材料和氧化镓 ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4.9 eV)。其中 GaN、SiC 材料已经在许多产业领域得到成功应用。在光电子领域,基于 GaN、InN、AlN 及其形成的固溶体合金全组分直接能隙的优异光电特性,发展了高效固态发光光源和固态紫外探测器件,填补



郑有焯,半导体材料与器件物理专家,中国科学院院士。长期从事半导体异质结构材料与器件物理研究,近年主要致力于第三代半导体材料与器件研究。

了短波长半导体光电子技术的空白,开启了白光照明、超越照明、全色 LED 显示和固态紫外探测新纪元,经过近 20 多年的发展,技术日趋成熟,产业蓬勃发展,取得了巨大的科学、经济和社会效益,2019 年市场规模达 6388 亿元。在电子领域,基于 GaN、SiC 的宽带隙、高电子饱和速度、高击穿电场、高热导率和低介电常数等优越的材料电子特性,发展了高效率、低功耗、高极端性能和耐恶劣环境的新一代微波射频器件(GaN)和功率电子器件(SiC、GaN)。GaN 射频器件与 GaAs 相比,具有更高工作电压、更高功率、更高效率、高功率密度,更高工作温度和更耐辐射能力。功率电子器件与 Si 相比,具有更高工作电压、高功率密度、高工作频

率、低通态电阻、极低反向漏电流和耐高温、耐辐照特性。

## 2 新基建时代的新机遇

当前,中国正在发力实施 5G 通信、物联网、大数据、云计算和人工智能新一代信息技术及其带动车联网、工联网、智能制造,智慧能源、智慧城市、医疗健康、轨道交通等垂直行业转型升级发展的新型基础设施建设(新基建),推动中国经济社会创新发展、高质量发展的牵引,成为第三代半导体继 21 世纪初顺应世界能源与环境发展战略需求迎来以 LED 半导体照明产业为特征的发展机遇之后,又迎来以第三代半导体电子技术产业为特征的新一轮新发展机遇。第三代半导体电子技术以其高效率、低功耗、高极端性能和耐恶劣环境的不可替代性优势在微波射频和功率电子两个领域对 5G 信息技术发展、新基建实施从技术底层发挥其重要的支撑作用。

1) 微波射频领域。射频器件是射频技术的核心基础器件,作为射频功率放大、有源射频开关和射频功率源具有广阔应用前景。GaN 射频器件与传统的硅横向扩散金属氧化物半导体(Si-LDMOS)和 GaAs 器件相比,具有更高工作电压、更高功率、更高效率、高功率密度,更高工作温度和更耐辐射能力的优势,支撑新基建的实施,从高阶高端的雷达、电子对抗、导航和空间通信等军事电子装备应用进入到 5G 基站、物

联网、激光雷达、无人驾驶汽车毫米波雷达、人工智能以及通用固态射频功率源等宽广的民用领域,开拓巨大的消费电子市场,有望重塑射频技术领域发展的新格局。例如,GaN射频器件作为5G基站射频功率放大器(PA)的核心器件,解决基站通信系统面临的巨大能耗瓶颈,引发GaN射频器件需求爆发式增长。5G宏基站高频段工作,损耗大,传输距离短,5G基站要达到4G信号的同样覆盖目标,将需4G基站数量的3~4倍(中国目前4G基站445万个),5G基站为提升网络容量采用大规模阵列天线技术(MIMO),64通道的MIMO阵列天线的单基站PA需求量接近200个,从而5G基站的耗电量是4G的3~4倍,5G基站整体能耗将是4G的9倍以上。因此,GaN射频器件以其不可替代性优势成为5G基站PA的必然选择,也是4G基站PA升级的主流方向;新建设的实施为GaN射频器件在雷达领域开拓了广阔的民用应用场景。GaN的毫米波雷达具有体积小、质量轻和分辨率高以及穿透烟、雾、灰尘能力强,传输距离远的特点,将在车联网、物联网、智能制造、智慧社会等诸多领域获得广泛应用,例如77 GHz频段的GaN毫米波雷达作为自动驾驶汽车的远程探测器,用来精确感知周边障碍物,以实现自动紧急制动、自适应巡航、前向碰撞预警等主动安全领域的功能。

2) 功率电子领域。功率电子器件是电能变换、管理的核心器件,器件的能效决定了电子系统、装备和产品的能耗高低、体积和重量大小、成本和可靠性高

低以及智能移动终端的续航能力。现代电子系统或装备对功率电子器件的需求越来越高,不仅要求更高功率密度和更高能效而且要求具有高极端特性和耐恶劣环境性能,传统的Si功率电子器件转换效率较低、需以巨额能耗为代价,而且器件性能诸如阻断电压、开关频率、转换效率和可靠性的提升又逐渐接近Si材料物理极限,面临严峻挑战。SiC、GaN功率电子器件拥有超越Si器件的优异特性,可满足5G信息技术新基建领域的新需求,解决数据中心、无线基站等信息基础设施面临的巨大能耗瓶颈以及支撑IT移动智能终端实现小型化、轻量化、并提升续航能力,支撑新能源汽车、智慧能源、轨道交通、智能制造等新基建优势应用领域产业发展的迫切需求。SiC、GaN功率电子器件因其材料电气性能差异适于不同的电力应用场景:SiC功率器件应用于高压、大功率的电力管控,诸如新能源汽车及其充电基础设施和新能源电力逆变装置和智慧能源系统。据测试数据报道,新能源汽车采用SiC功率模块的逆变器可使开关损耗降低75%(芯片温度215℃),逆变器尺寸下降43%,质量减轻6 kg,使汽车连续续航里程增加20%~30%。中国是全球最大的新能源汽车市场,2019年中国新能源汽车销量116万辆,占据全球54%,车用功率器件市场增量巨大,为SiC功率电子器件与模块产业带来巨大的发展空间;GaN功率器件应用于低电压、高频的电力管控,面对消费类电子领域具有极其广阔的应用前景。特别是基于其工

作频率高、动态损耗小、导通电阻低以及耐高温、发热量低的优异性能,极适合作为开关电源应用,为现代各种消费类电子终端提供绿色高效电源。例如作为电源适配器快充电源,解决Si器件实现快充面临提升功率又增大体积的矛盾,使电源功率损失和尺寸锐减达50%,不仅可缩短手机充电时间,有效提升续航能力,而且有望实现手机、平板电脑、游戏机、AR眼镜、VR头盔等各种移动终端充电的一体化,支撑可携带IT终端产品的发展,成为当前GaN功率电子产业发展的风口,预计到2025年全球GaN快充产品市场将达到600多亿元。GaN功率器件与SiC相比,开关速度更快,通态电阻更低,驱动损耗更小,转换效率更高,发热更低,且Si基GaN器件更有成本较低的优势,因此GaN功率电子技术不仅在面广量大的消费类电子领域,而且在新基建各种中低压应用场景中有着极其广泛的应用前景。

### 3 前景展望

在5G信息技术时代,第三代半导体迎来新发展机遇,新基建的实施助推第三代半导体产业发展进入黄金窗口期,呈现一派发展好势头,有望逐步实现自主可控、安全可靠的第三代半导体产业体系,与第一代、第二代半导体优势互补、协同支撑新一代信息技术创新发展,支撑中国新时期社会经济的高质量发展。

郑有叫

(南京大学电子科学与工程学院,  
210033)