文章编号: 1007 - 4252(2020)03 - 0003 - 177

化合物半导体发展现状分析

黄嘉晔*,王轶滢,叶树梅,戴梅
(中国科学院上海微系统与信息技术研究所战略研究室,上海 200050)

摘要: 化合物半导体作为宽禁带半导体是高温、高频、抗辐射及大功率器件的适合材料。2020 年全球化合物半导体的市场规模约为 440 亿美元,2020 年之后其市场需求随着 5G 商用、汽车电动化、人工智能将呈现持续性增长趋势。化合物半导体的主要材料包括砷化镓、磷化铟、氮化镓、碳化硅及以金刚石,氧化镓为代表的超宽禁带化合物半导体。化合物半导体的主要器件包括射频器件、光电器件和功率器件,在国防、航空航天、石油勘探、宽带通讯、汽车制造、智能电网等领域有重要应用。化合物半导体的发展需要产业界的协同创新,既要与科研院所进行产学研联合,也要贴切下游的应用企业需求。

关键词: 化合物半导体; 技术趋势; 产业分析
中图分类号: TN25/TN915 **文献标志码:** A

Analysis of the Development Status of Compound Semiconductors

HUANG Jiaye, WANG Yiying, YE Shumei, DAI Mei
(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology Strategic Research Office, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Compound semiconductors are wide bandgap semiconductors and they are suitable materials for high-temperature, high-frequency, anti-radiation and large power devices. In 2020 global compound semiconductor market scale is about 44 billion US dollars. With the rapid progress of 5G, AI and automotive electrification, the market will continuously grow further. Compound semiconductors mainly comprise GaAs, InP, GaN, SiC and ultra wide bandgap semiconductors such as diamonds and Ga_2O_3. Devices based on compound semiconductors include RF, optoelectronics and power devices, which have important applications in national defence, aerospace, petroleum exploration, wideband communication, automotive, smart grid. Development of compound semiconductors need collaborative innovation through the whole industry, referring not only to collaborate with research institutes and universities but also to understand the needs from application enterprises clearly.

Key words: Compound semiconductors; Technology trends; Business analysis

---

收稿日期: 2020-05-10; **修订日期:** 2020-06-09

通信作者: 黄嘉晔(1983-),男,上海,博士,现任中国科学院上海微系统与信息技术研究所战略研究室战略研究主管,有 10 多年集成电路领域技术与管理经验,曾任职于德国弗劳恩霍夫研究所与德国西门子公司(E-mail: jiaye.huang@mail.sim.ac.cn)

0 引言

半导体材料在过去主要经历了三代变化。第一代半导体材料以硅(Si)和锗(Ge)等元素半导体为代表,主要应用于低压、低频、中功率晶体管、光电探测器等。第二代半导体以砷化镓(GaAs)和磷化铟(InP)等化合物半导体为代表,主要应用于微波、毫米波器件、发光器件等。第三代半导体以 GaN、SiC 等宽禁带化合物半导体为代表,主要应用于高温、高频、抗辐射、大功率器件、半导体激光器等。

与第一代单质半导体相比,第二代和第三代化合物半导体材料具有高热导率、高击穿场强、高饱和电子漂移速率和高键合能等优点,可以满足现代电子技术对高温、高功率、高压、高频以及抗辐射等恶劣条件的新要求。化合物半导体材料是半导体材料领域最有前景的材料,在国防、航空、航天、石油勘探、光存储等领域有着重要应用前景,在宽带通讯、太阳能、汽车制造、半导体照明、智能电网等众多战略行业可以降低 50%以上的能量损失,最高可以使装备体积减小 75%以上,对人类科技的发展具有里程碑的意义。

本文主要从化合物半导体典型材料、技术发展趋势,产业情况分析进行阐述,为后续化合物半导体的发展提供一定的参考。

1 化合物半导体介绍

化合物半导体典型材料包括 GaAs、InP、GaN、SiC、以及以 Ga_2O_3和金刚石为代表的超宽禁带化合物半导体。

1.1 GaAs 材料及器件

GaAs 晶体结构为立方闪锌矿结构,外观呈现黑灰色固体。当两套面心立方晶格均沿对角线位移 1/4 距离时,便会组成立方闪锌矿结构,每个 As 原子周围都有 4 个 Ga 原子,而每个 Ga 原子周围又有 4 个 As 原子,彼此均为正四面体结构。GaAs 的禁带宽度为 1.42eV,是一种直接带隙半导体材料,晶格常数 5.653Å,熔点为 1238K。

GaAs 材料器件具有高频、高速、低噪音、低能耗等优良性能,因此,GaAs 材料在推动信息的高速传递与高效处理上有着重要的作用。GaAs 材料器件主要包括微电子器件和光电器件。在微电子器件方面,半绝缘 GaAs 材料在制作电子器件和集成电路方面有着广泛的应用。GaAs 金属-半导体场效应晶体管(MESFET)、高电子迁移率晶体管(HEMT)、GaAs 基异质结双极晶体管(HBT)等器件在民用通讯、微波通信以及国防军事领域中有着重要的应用,这对推进 GaAs 的发展起到了非常大的促进作用。在光电子器件方面,GaAs 材料主要用于制作发光二级管(LED)、激光器(LD)以及太阳能电池。GaAs 材料制备的光电子器件主要应用于光通信、交通信号灯以及国防军事等领域中。

1.2 InP 材料及器件

InP 是一种具有闪锌矿结构的 III-V 族化合物半导体材料,质地软脆,呈银灰色光泽。晶格为面心立方结构,每个 In 原子近邻 4 个 P 原子,或每个 P 原子近邻有 4 个 In 原子,配位数为 4,与金刚石结构类似,化学键为四面体键,键角为 109°28′,晶格常数 5.869Å。

InP 与三元合金 InGaAs 以及四元合金 InGaAsP 晶格匹配,因此常作为波长在 1.3-1.55 微米光通信中的激光器、光调制器和探测器,以及高电子迁移率晶体管(HEMT)、异质结双极晶体管(HBT)等高频电子器件所必需的衬底材料。

1.3 GaN 材料及器件

GaN 是氮和镓的化合物,通常情况下为白色或者微黄色的固体粉末,具有禁带宽度大、热导率高、耐高温、抗辐射、耐酸碱、高强度和高硬度等特性,禁带宽度为 3.4eV,击穿电压为 2.0×10^6 V/cm,饱和电子漂移速率为 2.5×10^7cm/s,熔点约为 1700℃。GaN 具有高的电离度,在 III-V 族化合物中是最高的(0.5 或 0.43)。GaN 具有三种晶体结构,它们分别为纤锌矿、闪锌矿和岩盐矿。闪锌矿结构在高温的条件下会转变成更加稳定的纤锌矿结构,岩盐相是 GaN 的高压相结构(压力一般大于 37GPa)。在大气压力下,GaN 以纤锌矿结构稳定存在,每个元胞中有 4 个原子,体积大约是 GaAs 的一半,因其硬度大,所以又是一种良好的涂层保护材料。

GaN 材料器件主要包括功率器件、射频器件和光电器件。GaN 作为第三代半导体材料,广泛应用于电力电子领域中,功率器件具备高转换效率、低导通损耗、高工作频率的特点,产品包括 HEMT、SBD、

常关型 FET、常开型 FET、Cascode FET 等，制造工艺有 HEMT、SBD、Power FET 等，衬底为 GaN-on-Si 外延片，工艺制程为 0.5μm-0.25μm，主要应用于快速充电、无线充电、电源设备、数字电视、轨道交通、自动驾驶、新能源汽车、智能电网、光伏等领域。GaN 射频器件具备更高功率、更高效率、更大带宽的特点，器件产品包括功放 PA、LNA、开关器、MMIC 等，制造工艺有 HEMT、HBT 等，衬底为 GaN-on-Si、GaN-on-SiC 外延片，工艺制程由 0.5μm -0.25μm 向 0.15μm -0.1μm 过渡，主要应用于 5G 基站通信、卫星遥感、军事通讯、相控阵雷达、电子抗干扰等领域。GaN 光电器件应用产品包括 LED、Micro LED、PD、LD、VCSEL 等，主要应用于半导体照明、激光显示、探测等领域。GaN 基 LED 具有发光效率高、节能、环保、寿命长、体积小等优点，基于 LED 的半导体照明被认为是最有可能替代传统照明的新型固态冷光源。

1.4　SiC 材料及器件

SiC 是一种二元半导体化合物，是元素周期表第 IV 主族元素中唯一的固态化合物，也是 Si 和 C 的唯一稳定化合物。SiC 禁带宽度为 3.2eV，击穿电场为 0.8-3.0×10^6V/cm，饱和电子漂移速率为 2×10^7cm/s，热导率为 4.9Wcm^{-1}K^{-1}。SiC 晶体结构分为六方晶体与立方体，即 α-SiC 和 β-SiC，β-SiC 在高于 2100℃时转变为 α-SiC。α-SiC 的晶体结构中，由于碳和硅原子堆垛顺序不同，构成多种变体，目前已发现 200 多种。在 SiC 衬底中目前被研究和应用的主要有三种构型：3C-SiC（立方体）、6H-SiC（六方体）、4H-SiC（六方体）。其中 4H-SiC 禁带宽度最大，具有高临界击穿电场、高电子迁移率，适于制造耐高压高温、抗辐照的功率半导体器件。

在全球产业都在向着绿色、低碳、节能、环保方向发展的大趋势下，SiC 材料及其器件以其独有的特性越来越受到关注。SiC 外延材料主要用于制作大功率微波功率器件和高功率电力电子器件。从器件类型上看，主要的 SiC 功率半导体器件包括：二极管、PIN 二极管、双极性晶体管、晶闸管、MOSFET、IGBT 等，其中肖特基二极管、MOSFET 和 IGBT 是应用最广泛及性能指标先进的功率器件。GaAs 微波功率器件仍是目前电子信息装备的核心微波功率器件，但由于 GaAs 材料在电子迁移率、散热、材料强度等方面的限制，使得其已无法满足各种电子信息装备发展的需求。SiC MESFET 将在 0.5-3GHz 频率范围超过 Si 器件和 GaAs 基器件，以满足下一代电子信息装备对微波功率器件更大功率、更小体积和更恶劣高温度下工作的要求。

1.5　超宽禁带化合物半导体

现有半导体材料根据禁带宽度不同分为：窄禁带半导体材料（带隙小于 2.3eV 的锗、硅及 III-V 价元素等）、宽禁带半导体材料（带隙 3.3～3.4eV 的 SiC、GaN）及超宽禁带半导体材料（带隙大于 3.4eV 的金刚石、Ga_2O_3等）。超宽禁带半导体（Ultra wide-band gap semiconductors，UWBG 半导体）带隙均大于 GaN（3.4eV），其击穿电场、热导率、电子迁移率等性质，以及耐高压、耐高温、高频、抗辐射能力均优于现有已经应用的宽禁带半导体材料。在超高压电力电子器件、射频电子发射器、深紫外光电探测器、量子通信和极端环境应用等领域有巨大的应用前景。下面介绍超宽禁带半导体中两种最主要的材料金刚石和氧化镓 Ga_2O_3。

超宽禁带半导体材料金刚石具有击穿场强高、饱和速度大、化学稳定性好、耐辐照、热导率极高等优点，可以满足未来大功率、强电场、极端强辐射等方面的应用需求。但是目前金刚石除了作为热沉和探测器应用以外，其他方面的产品尚处于研究的阶段。金刚石人工外延技术发展迅速。基于同质外延技术已经实现了两英寸的单晶金刚石，缺陷密度小于 1000 cm^{-2}，基于异质外延也实现了 4 英寸的面积。但是同质外延依赖于衬底的质量和大小，异质外延则成核和缺陷控制较难，这都严重限制了金刚石的发展。

氧化镓（Ga_2O_3）作为继 GaN 和 SiC 之后的下一代超宽禁带半导体材料，其禁带宽度约为 4.8 eV，理论击穿场强为 8 MV/cm，被广泛应用于高性能电源开关、射频放大器、日盲探测器、恶劣环境信号处理方面。Ga_2O_3有 5 种同分异构体，分别为 α、β、γ、δ、ε，其中 β-Ga_2O_3是稳定相，α 相和 ε 相是亚稳相，γ 相和 δ 相稳定性差，应用最广泛的为 β-Ga_2O_3。Ga_2O_3目前主要的器件包括 SBD 与 MOSFET，主要的应用领域包括高性能电源开关、射频放大器、日盲探测器、恶劣环境信号处理方面。

2 化合物半导体技术发展趋势

化合物半导体击穿电场高、热导率高、电子饱和速率高、抗辐射能力强等优越性能，在高温、高压、高频、大功率、高效节能等方面扮演着极其重要的角色，在国防安全、军工雷达等军用领域以及 5G 通信、电力电子等民用领域均发挥着巨大的作用。

综上，针对已经市场化应用的化合物半导体 GaAs、InP、GaN、SiC，其器件类型以及应用领域总结如下表。

表 1 主要化合物半导体器件类型和应用领域总结

Table1Major compound semiconductor device types and applications

应用领域	器件类型	器件种类	InP	GaAs	GaN	SiC
5G 通信、国防	射频器件	HEMT	√	√	√	
		pHEMT		√		
		MESFET		√		√
		HBT	√	√	√	
		DHBT	√			
		MMIC/RFIC		√	√	
照明、3D 传感	光电器件	半导体激光器	√	√	√	
		APD/PD	√	√	√	
		LED	√	√	√	
汽车、电力电子	功率器件	HEMT			√	√
		Cascode			√	√
		SBD			√	√
		MOSFET				√
		IGBT				√

2.1 射频器件

射频器件包括射频开关、LNA、PA、滤波器、调谐器和毫米波 FEM 等，其中 PA 和滤波器是射频器件的重要部分。

基于功耗和成本等因素，消费终端产品更多采用 CMOS 技术；CPE 采用 CMOS 和 SiGe BiCMOS；低功耗接入点则采用 CMOS、SiGe BiCMOS 和 GaAs。

4G LTE 频段，射频 PA 采用的工艺分别是 GaAs、SOI、CMOS 和 SiGe，4G 智能手机中 PA 均采用 GaAS，GaAs 占有绝对地位；射频开关采用 SOI、GaAs 工艺；LTE LNA 采用的工艺多为 SOI、CMOS；宏基站、小基站领域则是 GaAs 和 GaN 并存。

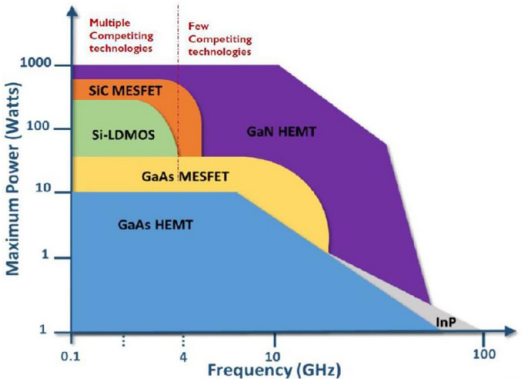

图 1 射频器件中不同材料频率和功率应用范围

Fig.1 Material frequency and power range in RF devices

5G Sub 6GHz 频段，手机射频器件仍是 GaAs 的主场，基站端会采用 GaN-on-Si 射频器件；射频前端将向封装集成、单片集成、天线集成发展，RFIC/MMIC 是芯片集成趋势。

5G 毫米波频段，GaN-on-SiC、GaN-on-GaN 射频器件有很大潜力，传统的 GaN HEMT 不能满足要求，AlGaN/GaN HEMT 高频器件还在研究阶段。

2.2 光电器件

目前，光电子分立器件主要材料是以 GaAs 和 InP 为代表的化合物半导体材料，用于制作高速、高频、大功率以及发光电子器件，光电子集成主要材料为 SOI 和 SiN。光电子器件主流市场以分立器件为主，产业发展较为成熟，但光电子集成是未来重要的技术发展方向，潜力巨大。基于不同化合物半导体材料，可制作不同波段半导体激光器、光电探测器等光电子器件，如图 2 所示。

在化合物半导体激光器中，主要以 GaAs、InP 等为增益介质，转换效率较高，包括 VCSEL、DFB、EML，超辐射发光二极管(SLED)、LD，分别适用于不同的传输距离和速度。

在光电探测器中，包括光电二极管(PIN)检测器和雪崩光电二极管(APD)检测器，PIN 用于短距离、对灵敏度要求不高的光通信系统中，响应带宽为 2.5Gb/s，10Gb/s，25GGb/s，40Gb/s；APD 灵敏度高于 PIN，响应带宽为 2.5Gb/s，10Gb/s，20Gb/s，主要

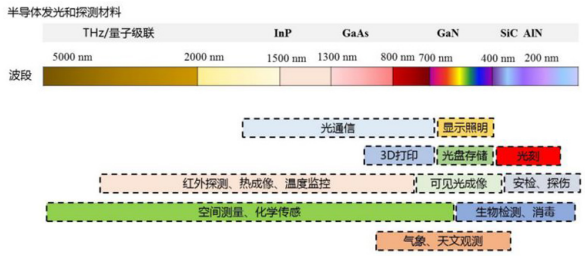

图 2　对应不同波段的化合物半导体材料及主要应用领域

Fig. 2 Different wavelength compound semiconductors and applications in optoelectronic devices

以 GaAs 材料为主，应用于光纤通信系统、单光子探测、航天探测。

在 LED 中，主要以 GaAs 和 GaN 衬底为主，根据应用波段不同，可分为红橙黄 LED 和红外 LED，主要是 GaAs，蓝光 LED 材料为 GaN。除普通 LED 外，micro-LED 和 mini-LED 等领域应用。此外，基于 InP 技术生产量子点发光二极管 QLED，是继 AMOLED 之后更具颠覆性的显示技术，目前三星以实现量产。

2.3　功率器件

Si 基功率器件在可预见的未来仍然是主流技术，但基于硅的器件具有一些局限性，例如高传导损耗和低开关频率，其将受到 GaN 与 SiC 功率器件的挑战。GaN 与 SiC 在功率范围上的应用不同，仅在 600-900V 中压领域存在竞争关系。

图 3　GaN 功率器件与 SiC 功率器件不同的应用范围

Fig.3 GaN and SiC power device comparison

功率半导体的小型化与低功耗发展趋势促进了宽禁带半导体的快速发展。从功率半导体的发展轨迹来看，高功率、小型化与低功耗是技术演进的方向，但三者的关系有层次之分: 不同应用场景对功率的硬性要求不同，在满足特定功率要求的基础上，新的技术、工艺都在尽量追求小型化和低功耗。GaN 和 SiC 是宽带隙材料，晶体中原子的键能更高，与基于硅的同类产品相比，SiC 和 GaN 具有更高的效率和更小的形状因数特性，在具有相同的相对电压和电流处理能力的情况下，这些器件的尺寸可以小得多，更符合功率半导体的发展趋势。

SiC 功率半导体商业化的最大瓶颈是衬底成本过高。晶体生产难度大导致 SiC 材料昂贵，根据 yole development 测算，单片成本 SiC 比 Si 基产品高出 7-8 倍。

在 Si 衬底上实现 GaN 功率器件产业化成为业界的共识。GaN 外延所需的同质 GaN 衬底或 SiC 衬底价格昂贵，而 Si 衬底具有大尺寸、低成本的优势。

3　化合物半导体产业分析

目前驱动化合物半导体市场发展主要由三大动力构成: 1) 人工智能: 随着 Face ID 等人脸识别功能在手机上的普及，全球激光器 VSCEL 的出货量预计会从 2017 年的 3，600 万颗扩大 22 倍到 2020 年的 8 亿颗; 2) 汽车电动化: Infineon 估算，每台乘用车所需的功率半导体，从燃油车的 75 美金上升到 4.7 倍到纯电动的 350 美金; 3) 2020 年 5G 商用化后，新增频段会带动每台手机 PA 搭载数量大幅度增加。

中金公司预测全球化合物半导体行业规模将从 2017 年的 296 亿美元增加到 2025 年的 673 亿美元，CAGR 达到 10.8%。

基于对市场在未来 2-5 年爆发的预期，国内外各部门纷纷加速布局化合物半导体领域。目前，国内科研院所及高校相较国际水平差距不多; 国内产业链正在逐步形成，晶圆代工与器件设计环节本土领域力量较强，但衬底材料与配套设备、整体产业链的企业实力仍与行业龙头相去甚远。

和集成电路一样，化合物半导体市场也存在整合器件制造商(IDM) 、代工厂(Foundry) 和无厂公司(Fabless，有时是轻厂 Fab-lite) 三种商业模式。

3.1　GaAs

GaAs 行业的龙头企业仍以 IDM 模式为主，厂商包括美国的 Skyworks、Qorvo、Broadcom/Avago、Cree，以及德国 Infineon; 与此同时，代工业务发展顺利，代工比例持续提升。Avago 和 Skyworks 自身产

能不足时，会将部分订单分别外包给中国台湾地区的纯代工厂稳懋和宏捷科技。IDM 大厂正加速转入 Fab-lite 甚至 Fabless 的经营模式，2017 年，Avago 就将其位于科罗拉多的晶圆厂出售给稳懋。高通等设计企业也与稳懋等代工企业长期保持稳定的合作关系。

据 Strategy Analytics 统计，2018 年稳懋、宏捷科和美国 GCS 三家纯代工厂在 GaAs 晶圆代工市场的占有率之和达到了 88.2%，稳懋一家就独占 7 成江山。稳懋能为全球第一大砷化镓晶圆代工厂，与其制程与技术都自行开发有密不可分的关联，除与 Avago 拥有稳定合作关系外，客户分布状况也较平均，抽单风险较为分散。反观行业第二的宏捷科，其技术由 Skyworks 转移而来，并且从中获得主要订单，在服务其他客户、尤其是 Skyworks 竞争对手时，就极为掣肘。

3.2 GaN

在 GaN 行业中，初创企业如 EPC、GaN Systems、Transphorm、Navitas 等，大多数为 Fabless 模式，并首选台积电(TSMC)、Episil 或 X-fab 作为代工合作伙伴；深耕射频及 PA 元件、车用电子等领域的传统巨头，如德国 Infineon，美国 On Semi、TI，意法 ST 和日本松下，虽然是 IDM 模式运营，但在 GaN 技术上则反而多通过晶圆代工厂取得产能。台积电在与德国 Dialog 等客户合作，提供 6 英寸 GaN 晶圆代工服务之后，近日宣布将与 ST 合作加速市场采用 GaN 产品。

世界先进积极投入 GaN 制程研发，2018 年顺利成为全球首家提供 8 英寸 GaN 晶圆的代工厂，抢占 GaN 晶圆代工市场。此外，GCS 和特种工艺晶圆代工厂 TowerJazz 也提供 GaN 代工服务。

3.3 SiC

目前 SiC 行业的代工业务规模极小，典型晶圆代工大厂均未切入，IDM 模式企业占绝对主导地位，如 Infineon，ST 和美国的 Cree、On Semi，日本的罗姆、东芝等。但 IDM 企业之间也在整合程度上有所差别——例如 Cree 是完全垂直整合的，覆盖从 SiC 衬底到外延、器件的全制造环节。此外，罗姆和 ST 也有部分垂直整合，而其他大多数 IDM 则需要向竞争对手 Cree、罗姆或者其他第三方供应商采购衬底材料。2019 年，Cree 宣布投资 10 亿美元扩大 SiC 产能，建造一座采用最先进技术的自动化 200mm SiC 生产工厂和一座材料超级工厂，实现 SiC 晶圆制造产能和 SiC 材料生产的 30 倍增长，以满足 2024 年之前的预期市场增长。

虽然面临诸多技术与价格挑战，但仍有一些 SiC 代工厂在努力。PowerAmerica 在 2016 年为 X-Fab 提供了支持，合作设计了用于制造 SiC 器件的工艺套件和其他技术，该工厂位于其德克萨斯州的 150 毫米晶圆厂仍在开发 SiC 代工服务。Episil 正在将其 SiC 晶圆代工厂从 100mm 转变为 150mm。三安也推出了 150mm SiC 代工服务。已有 ABB，GeneSiC，Global Power，Microchip，Monolith 和 United-SiCSiC 等器件供应商使用代工厂生产产品。

4 总结与展望

化合物半导体材料正在成为全球战略竞争新的制高点，美、日、欧等各国纷纷积极进行战略部署。随着 5G 商用、人工智能、汽车电动化的快速推进，化合物半导体发展将迎来新的发展机遇。本文从化合物半导体的主要材料及其器件、技术发展趋势、产业机遇及商业模式分析等角度对目前化合物半导体的发展现状做了梳理。根据国内外的发展现状，提出以下几点发展建议。

强化创新引领，推进产研结合。基础研究是实现科技创新，成果转化的创新源头。化合物半导体在新材料、新工艺、新器件上的突破发展需要前沿基础研究领域的厚积薄发。建议建立围绕化合物半导体的产学研体系，依托现有基础设施，瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，将科学研究、成果转化、产业发展紧密结合，迅速实现商品化、产业化。

紧贴下游应用，抓住市场需求。化合物半导体的发展离不了下游应用市场的快速增长。随着 5G 商业化、汽车电动化、光通信和 3D 感测的高速发展，与之对应的化合物半导体射频器件、功率器件、光电器件前景广阔。建议化合物半导体的研究要与下游终端用户企业紧密贴合，抓住市场需求，抢占行业发展先机。

协同支撑产业，推进全链发展。材料与装备是发展半导体产业的重要支撑基础，也是我国半导体产业链中自给能力最弱的短板。目前国内化合物半

导体材料企业生产环节中切磨抛设备几乎均从国外进口。半导体材料加工效果直接影响到器件的性能,化合物半导体材料作为新一代半导体材料,其加工机理的研究欠缺。建议在建设化合物半导体过程中,协同国产装备厂商,共同研发,推动以材料、工艺带动国产装备发展,进而实现化合物半导体产业技术的全面突破。

参考文献:

[1] Michael Shur.碳化硅半导体材料与器件 [M]. 北京: 电子工业出版社,2012.
[2] 郑有科,吴玲,沈波.第三代半导体材料 [M]. 北京: 中国铁道出版社,2017.
[3] 朱丽萍,何海平. 宽禁带化合物半导体材料与器件 [M]. 杭州: 浙江大学出版社,2016.
[4] 黄乐平,丁宁,王兴林,宗佳颖,孔令鑫.化合物半导体的全球投资机会,中金公司证券报告,2018.
[5] 周金成,朱光远,李习周.化合物半导体特性及封装工艺控制 [J] .中国集成电路,2020.
[6] 李龙.GaAs 材料的制备与表征 [D] .太原理工大学, 2013.