

电子科学技术中半导体晶片材料：趋势洞察与产业展望

陈基生 罗晓清 陈达贵

福建江夏学院电子信息科学学院 福建 福州 350108

摘要：作为现代电子科学技术的核心，半导体技术的发展对信息技术、通信、消费电子等领域产生了深远的影响，而半导体晶片材料在半导体技术的发展过程中起着基础性的作用。人工智能（AI）、物联网（IoT）和5G等前沿科技的迅速崛起，对半导体器件的性能和功耗提出了更高的要求，驱动着第一代、第二代、第三代、第四代半导体晶片材料的并行发展。本文分析了四代半导体晶片材料中最具代表性的硅、锗、砷化镓、磷化铟、碳化硅、氮化镓、铟化镓和氧化镓的性能特征与应用领域，并对当前半导体晶片材料发展现状进行了分析，重点研究了电子技术中半导体晶片材料的发展趋势，旨在为半导体产业和电子产业的发展提供参考。^[1]

关键词：电子科学技术；半导体晶片；发展趋势

引言

半导体技术是推动现代电子技术进步的核心。随着信息技术的飞速发展，社会对高性能、低功耗电子设备的需求不断推动半导体材料的创新，人们逐步发展出不同的半导体材料。第一代半导体材料主要包括硅（Si）和锗（Ge）体系，它们被广泛应用于传统微电子领域。而后，信息领域越来越丰富的应用需求推动研究者开发出了以砷化镓（GaAs）和磷化铟（InP）为代表的第二代半导体材料，以碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）为代表的第三代半导体材料和以窄禁带（如铟化镓GaSb、铟化铟InSb）及超宽禁带（如氧化镓Ga₂O₃、氮化铝AlN、金刚石）为代表的第四代半导体材料^[1]。值得注意的是，上述四代半导体晶片材料之间并不存在更替关系，而是根据各自独特的物理化学性质，在特定应用场景中发挥出不不可替代的作用。

1 半导体晶片性能与应用

第一代半导体材料极大促进了集成电路技术的发展。由于资源丰富、成本低且化学性质稳定，硅被广泛用于制造集成电路、分立器件和光伏电池等领域；而锗则因其较高的载流子迁移率，在高频和高速应用中展现出优势，尤其是在高速通信及红外探测器方面表现尤为突出。此外，单晶锗具有优异的红外光学特性，使其在

在红外光学元件方面具有重要应用价值。

为了弥补第一代半导体在高频和高功率的应用场景下的局限性，第二代半导体材料被开发出来。砷化镓因其较高的电子迁移率、比硅宽的带隙与直接带隙结构，而适用于高频射频器件和光电器件，如相控阵雷达收发组件、发光二极管和激光二极管。同样具备高电子迁移率和直接带隙特征的磷化铟则在光通信系统和微波毫米波器件领域展现出广泛应用前景，在光电探测和高效太阳能电池应用中展现出巨大潜力。

第三代半导体的发展是应现代高性能电子器件的需求而生，特别是在高电压、高功率、高频、高温等极端工作条件下，第一代和第二代半导体材料已经无法满足新的技术要求。碳化硅具有高热导率和宽禁带，适合高温高功率环境，广泛应用于电力传输、汽车电子和航空航天。氮化镓凭借其宽禁带与高电子迁移率，适用于高功率射频器件，如高速数据传输和高效散热系统。此外，由于直接带隙特性，氮化镓在蓝光以及紫外发光二极管和激光器中表现出卓越的性能。

虽然第二代半导体在近中长波红外领域取得了显著进展，第三代半导体在高电压、高功率应用中展现出了优异性能，但在某些特殊的应用场景中，这两类材料仍存在一定的局限性。例如，第二代半导体在中远红外波段范围覆盖不足；而在更高电压应用中，第三代半导体稳定性仍需进一步提升，因此推动了第四代半导体材料的开发。第四代半导体如铟化镓，由于具备较窄的带隙和高电子迁移率，在红外探测器和高速电子器件中展现优势，尤其是在近红外光电转换中表现出色；而超宽禁带材料氧化镓凭借其高击穿电场和耐高温、高压的特点，有望在高功率电子器件和紫外光电探测器等领域取代传

基金项目：福建省自然科学基金项目（编号：2022J01959）

作者简介：陈基生（1976—），男，现为电子科技大学的博士研究生，目前主要研究的领域是半导体技术创新，是厦门中芯晶研半导体有限公司和厦门华芯晶圆半导体有限公司的总经理。

统硅基器件，推动下一代电子技术的发展。料的性能参数，清晰地展示了半导体晶片材料的优势，以帮助读者更好地理解其适用场景。

表1 第一、第二、第三和第四代半导体材料性能对比

项目	第一代		第二代		第三代		第四代			
	Si	Ge	GaAs	InP	4H-SiC	GaN	GaSb	InSb	Ga2O3	AlN
禁带宽度（eV）	1.12	0.66	1.4	1.3	3.2	3.4	0.725	0.18	4.8~4.9	6.2
电子迁移率（cm ² /Vs）	1250	3900	8500	5400	900	600	3000	78000	300	135
热导率（W/cmK）	1.5	0.31	0.5	0.7	4.5	2.1	0.39	0.15	0.27	3.4
饱和电子漂移速率（10 ⁷ cm/s）	1	0.7	2	1	2	2.5	/	4.0	2.42	2.2
击穿场强（10 ⁶ V/cm）	0.3	/	0.4	0.5	2.2	3.3	/	/	8	2
相对介电常数	11.7	16	13.1	12.5	9.7	9.8	15.69（ε ₀ ）；14.44（ε _∞ ）	17.9	10	8.5

2 半导体晶片的发展现状

近年来，各国政府加大支持集成电路产业的发展，推动半导体市场繁荣并加剧了产业竞争。同时，技术进步刺激市场需求持续增长。

2.1 市场规模不断扩大

电子信息产业的蓬勃发展推动全球半导体晶片需求的增长，但增长呈现差异。Statista数据显示，2017~2023年，全球硅片市场规模从87亿美元增长至123亿美元，实现了4.87%的复合年增长率（CAGR）^[2]。Yole报告了该时段砷化镓晶片市场从1.7亿美元增长至3.88亿美元，CAGR达16.28%。磷化铟光子器件将在2021~2027年间从25亿美元增加到56亿美元，其CAGR为22.1%，反映了磷化铟衬底需求的持续增长。此外，2017~2023年，碳化硅全球功率器件市场从3.02亿美元增长到13.99亿美元，实现28.75%的CAGR；而氮化镓射频器件市场从3.8亿美元增至13亿美元，CAGR达22.11%。该数据反映了作为高性能器件基础材料，碳化硅和氮化镓晶片需求的快速增长。2022年至2028年，第四代半导体中，铟化镓衬底市场将从1100万美元稳步增长到1400万美元，表现出4.15%的CAGR^[3]。相比之下，氧化镓从250万美元增长至600万美元，CAGR达16%。氮化铝则以22%的CAGR从400万美元增至1300万美元。由此可见，硅片在全球半导体市场中仍占据主导地位，且增速平稳。第二代半导体晶片市场增长较快，与此相对，第三代半导体晶片正经历快速增长阶段，并推动半导体技术与产业的革新，第四代半导体则展现出多维度的增长潜力，为未来创新注入新的动力。

2.2 技术水平不断提高

由于半导体技术对国家经济、科技创新和国防安全具有战略意义，因此各国在半导体晶片的研发和生产方面投入了大量资源，不断推动技术水平的提高。就硅片而言，国内的企业及研究机构通过高强度研发投入，

开发出的成熟制程、功率半导体硅片技术已能够支撑批量生产，满足下游需求，同时，先进制程硅片技术正在加速突破；在其它三代半导体方面，国内学者在晶体生长、外延生长以及器件制造等关键技术上取得了重要突破，其中，顶部籽晶溶液生长法（TSSG）为碳化硅单晶生长带来了显著创新。Wang G等人采用TSSG法生长出高质量、晶圆级3C-SiC单晶，非常适合同质外延和器件制造，该方法展现出进一步大规模生产的潜力^[4]。

2.3 产业竞争日益激烈

技术创新加速、市场需求持续扩大、地缘政治关系紧张、供应链脆弱以及各国政府政策支持等各种因素使得全球半导体晶片市场竞争异常激烈。目前，在该市场占据主导地位的企业来自美、欧、日、韩等国，这些企业在技术、资金和市场份额方面具有明显优势，并通过不断增加研发投入、扩大产线规模来巩固其市场地位。但是，中国等新兴经济体也在通过自主研发和技术引进等方式，积极提高技术水平，以增强自身在该市场的竞争力。

3 半导体晶片的发展趋势

半导体晶片的发展不仅推动了现有应用场景的创新，而且为未来电子科学技术的发展创造了条件。为了更好地应对技术挑战 and 市场需求，半导体晶片材料将在新兴应用、尺寸、性能、集成度以及材料体系多样化等方面持续进化。

3.1 新兴应用不断扩展

随着技术的不断创新与发展，半导体晶片从传统的逻辑芯片、存储和通信等领域，迅速向AI、IoT、5G通信、汽车电子、光电探测、智能制造、医疗设备和可穿戴设备等新兴领域扩展。目前，碳化硅基逆变器、电动驱动模块、充电系统在汽车中已经得到了广泛应用；基于碳化硅衬底开发的增强现实眼镜（AR）也已成功制备。

3.2 向大尺寸方向发展

扩大半导体晶片尺寸可以显著提高材料的利用率,从而提高生产效率、降低成本以及改善产品性能,进而增强企业的市场竞争力。从技术发展来看,大尺寸硅片能够进一步提高芯片的集成度,是集成电路制造的发展趋势。在摩尔定律的推动下,硅晶片的主流尺寸已经发展到了8英寸、12英寸。同时,450mm(18英寸)硅片也在研发中。由于大尺寸晶片能够使单位芯片成本显著降低,因此探索更大尺寸晶片的制造技术也是其他化合物半导体发展的重要方向。氮化镓晶片已经从4英寸发展到了6英寸;碳化硅晶片的主流尺寸正向8英寸发展,12英寸的晶体正在研发中。此外,当前的生长技术已实现了2~4英寸铌化镓晶片的批量生产与应用,而6英寸的晶片也在研发中。现今,国内部分厂商已经实现了2~4英寸氧化镓衬底的小批量生产,也成功研制出了6英寸单晶。

3.3 晶片性能不断提升

半导体晶片性能的提升可以应对更高的计算需求、降低能耗、支持高频高功率应用,以及满足新兴技术对效率、可靠性和器件小型化的要求。尽管四代半导体材料的晶体结构和物理性质不同,但提升材料性能的手段方法大致相同。首先,提高晶体质量、降低缺陷密度是提升半导体晶片性能的关键。一方面,原材料是提升晶体质量的基础。未来,将进一步发展超高纯度原材料的提纯技术,通过减少材料中氧、碳等杂质和掺杂含量,降低晶体中的位错和其他缺陷。另一方面,通过优化晶体生长技术、改善外延工艺、新型退火与掺杂技术,以减少晶体内部的缺陷和位错,进而提升载流子迁移率和器件性能。其次,随着晶体生长和外延技术的复杂性增加,未来将利用自动控制晶体生长技术、图像识别、机器学习(ML)和AI等手段来辅助晶体质量控制,以实时跟踪晶体生长中缺陷的产生,并通过快速反馈控制系统来对生长参数作出相应调整,避免缺陷进一步扩散。

3.4 集成化和多维化发展

半导体材料功能集成化的发展趋势是现代电子科学进步的核心驱动力之一。为了实现器件的不同功能,业界采取了异质集成和三维集成等不同的集成手段。异质集成技术是一种将各种不同材料和结构的半导体器件整合到一个芯片中的方法,其主要目的是实现更好的性能和更广泛的功能。现阶段,随着微电子技术逐渐向纳米级别发展,各种创新的半导体材料已经被研发并在各种集成电路中得到应用。例如,将硅基器件与碳化硅、氮

化镓等器件进行集成,能够充分发挥不同材料的优势,进而提升芯片功能的多样性和可靠性。在硅基光电异质集成领域,尤其是在材料方面,其发展从三五族材料与硅的异质集成逐步延伸到包括锗、氮化硅(SiN)和铌酸锂(LiNbO₃)等多种半导体材料在内的的综合应用。这些材料因其较低的移动性和较宽的禁带,可以有效地应对传统外延法在制备过程中遇到的挑战。此外,随着时间的推移,键合技术的逐步完善,不同半导体晶片材料与硅基材料的异质集成将成为未来发展的主流趋势。

3.5 材料体系多样化

材料体系多样化是推动半导体晶片发展的关键因素之一,它可以提高半导体器件在功率、速度、效率和可靠性等方面的表现。除了现有的硅、碳化硅、氮化镓等半导体晶片材料外,还涌现出了超窄与超宽禁带半导体材料,这些材料将共同推动半导体产业的发展。此外,为满足不同应用需求,二维半导体材料、拓扑绝缘体材料等新型的半导体材料不断被开发,这些材料具有独特的物理性质,有望在未来电子器件中得到应用。

结束语

半导体晶片材料的未来发展趋势呈现出大尺寸化、高性能化、集成化与多维化以及材料体系多样化等特征。新兴应用场景对材料性能的要求迫切提升,氧化镓等超宽禁带材料将成为下一个技术前沿,将在高功率和高频应用中获得突破。同时,通过持续的材料创新与技术突破,半导体晶片材料技术的发展将为电子科学技术的进步奠定更加坚实的基础。

参考文献

- [1]牛智川,徐应强,张宇,等.第四代半导体铌化物低维结构中红外激光器:从原理到器件[J].科技纵览,2021(10):4.
- [2]Statista. Silicon wafer market[EB/OL]. (2024-05-14)[2024-10-15]. <https://www.statista.com/statistics/585981/silicon-wafer-revenue-worldwide/#:~:text=In%202023%2C%20the%20total%20revenue,key%20building%20material%20for%20semiconductors>.
- [3]Yole Intelligence. Emerging Semiconductor Substrates 2023 [R]. Lyon: Yole Intelligence,2023.
- [4]WANG G, SHENG D, YANG Y, et al. High-Quality and Wafer-Scale Cubic Silicon Carbide Single Crystals[J/OL]. ENERGY & ENVIRONMENTAL MATERIALS, 2024, 7(4). DOI:10.1002/eem2.12678.