

半导体材料的发展演进及其标准化体系建设深度综述

李梦洋

天津科技大学

DOI:10.32629/acair.v4i2.20405

[摘要] 半导体材料是集成电路产业的物理基础,其技术迭代深刻推动微电子科学演进。随着摩尔定律在硅基材料趋近物理极限,碳化硅、氮化镓等宽禁带半导体材料正引领产业迈入功率电子与高频通信新时代。本文系统梳理第一代至第三代半导体材料发展历程,结合全球产业链竞争格局,重点探讨半导体材料提纯、拉晶、外延、封装检测及可靠性验证全链条标准化建设。研究表明,构建覆盖基础材料、制备工艺、测试方法、应用场景的多层级标准化体系,是降低产业链协同成本、提升芯片良率、助力国产半导体材料打破国际垄断的核心路径。本文针对我国半导体材料标准化短板提出优化策略,为产业自主可控提供参考。

[关键词] 半导体材料; 标准化; 第一代至第三代; 制备工艺; 可靠性规范; 国产替代
中图分类号: O471 **文献标识码:** A

A Comprehensive Review of the Evolution of Semiconductor Materials and the Development of Their Standardization System

Mengyang Li

Tianjin University of Science and Technology

[Abstract] Semiconductor materials serve as the physical foundation of the integrated circuit industry, with their technological advancements profoundly driving the evolution of microelectronics. As Moore's Law approaches its physical limits in silicon-based materials, wide-bandgap semiconductors such as silicon carbide and gallium nitride are ushering the industry into a new era of power electronics and high-frequency communications. This paper systematically reviews the development of semiconductor materials from the first to third generations, examines the global industrial chain competition landscape, and focuses on standardizing the entire process chain—from material purification and crystal growth to epitaxy, packaging/detection, and reliability verification. The study demonstrates that establishing a multi-tiered standardization system encompassing fundamental materials, fabrication processes, testing methodologies, and application scenarios is crucial for reducing supply chain coordination costs, improving chip yield rates, and enabling domestic semiconductor materials to break international monopolies. The paper proposes optimization strategies to address China's gaps in semiconductor material standardization, providing insights for enhancing industrial self-reliance and control.

[Key words] Semiconductor materials; Standardization; First to third generation; Preparation process; Reliability specifications; Domestic substitution

引言

信息时代下的半导体材料始终是产业核心。1947年贝尔实验室研制出第一支锗晶体管,开启了半个多世纪的微电子革命。材料物理极限决定器件性能上限,禁带宽度决定工作温度,击穿电场决定耐压等级,电子迁移率决定开关速度。美国半导体行业协会数据显示,过去30年全球半导体产业规模增长超15倍,材料创新贡献约40%的性能提升。当前半导体技术竞争已从实验室参数突破转向全球产业链话语权争夺,核心即标准化的确立。我国

半导体产业正处于追赶阶段,参与制定半导体材料标准是关乎产业自主可控的国家战略。

1 第一代半导体材料的标准化基础

1.1 硅材料的统治地位与物理特性

硅材料已统治半导体行业超70年,这得益于它出色的物理性能及其与产业化相契合的特点。硅的禁带宽度为1.12eV,在-55°C到125°C这一工业级温度区间可稳定运行,并包含消费电子、工业控制等主要应用场景。硅表面极易生成一层致密又

具有良好电学性能的自然氧化层,该氧化层介电常数较为稳定,界面态密度低,给平面加工工艺供应了优质的绝缘材料,也是MOSFET器件得以全面推广的关键因素。硅在地壳中的含量达到27.7%,其原料成本仅是砷化镓的1/200,有着突出的规模化生产能力。这些特性一起构筑了硅基文明的产业基础,也让硅成为了标准化体系最为完备的第一代半导体材料。

1.2 提纯与拉晶工艺的标准体系

电子级硅生产已创建起“工业硅→高纯多晶硅→单晶硅棒→硅片”全流程的标准体系。改良西门子法利用三氯氢硅把多晶硅纯度优化到13N;我国国标要求电子级多晶硅纯度不低于11N,两者之间的差距体现在硼、磷等浅能级杂质的控制精度上。直拉法拉晶标准显示,硅片径向电阻率的均匀性偏差应小于3%,氧含量需控制在25~35ppma之间,防止因高温流片而产生的位错造成器件漏电。区熔法对于高压功率器件而言,其氧含量要低于1ppma,电阻率均匀性偏差也要小于2%。这项标准主要被日本信越、SUMCO等企业所把握。

1.3 晶圆尺寸的标准化演进路径

按照SEMI1标准,晶圆直径逐步发展到4英寸、6英寸,再到8英寸、12英寸,18英寸的标准当前还在预研当中。标准化使得刻蚀、离子注入、化学机械抛光设备具备了全球通用性,极大地缩减了晶圆厂采购设备的成本。12英寸硅片的厚度标准为775微米±25微米,其边缘倒角半径均为0.5毫米,这有助于台积电、英特尔这些晶圆厂共享设备供应链。不同尺寸的晶圆标准有所差别:8英寸及以下的晶圆按照SEMI1-0318标准,而12英寸的晶圆则依照SEMI1-0302标准,后者的表面颗粒度、平整度等指标有着更为严格的要求。

2 第二代半导体材料的标准化挑战

2.1 砷化镓的射频特性与应用

20世纪90年代,无线通信逐渐兴起,砷化镓依靠其直接带隙特性迎来了发展契机。砷化镓的电子迁移率是硅的5到6倍,截止频率高于100GHz,在2G到5G通信射频前端模块中有重要地位。其在智能手机射频应用中的占比超过60%。砷化镓发光效率为硅的上千倍,这使其成为LED、VCSEL激光器的关键材料。现今全球砷化镓器件市场规模已达120亿美元。但是,砷化镓材料自身具有的独特性质给标准化带来了特别的难题:它的化合物结构使得制备工艺要比硅基材料复杂得多,因此要构建新的评价体系。

2.2 材料脆性与环保约束问题

砷化镓是由砷和镓化合形成的,其生产标准化遭遇环保和物理两方面的挑战。欧盟RoHS指令以及我国的《电子信息产品污染控制管理办法》均严格限制砷元素的使用及其回收,其中要求砷化镓器件的可回收率达到至少85%,这促使企业制定全生命周期的环保标准。砷化镓的硬度仅为硅的1/3,而且沿特定晶面极易解理。按照SEMI54的规定,其晶圆表面粗糙度应小于0.5nm,这就需要与之相适应的低应力抛光液以及低损伤切割设备。这些特别的要求明显不同于硅基材料的标准化途径,使从材料生长直至器件制造的工艺变得更为繁杂。

2.3 组分均匀性与加工精度规范

砷化镓中砷与镓的摩尔比要控制在 1 ± 0.001 这个范围之内,如果超出这个范围就很可能出现点缺陷,使得器件的漏电流变大。我国的GB/T26072-2010标准规定组分偏差得小于 ± 0.005 ,不过和国际上最先进的水平相比还是有着很大差距。砷化镓晶圆制作的时候,翘曲的控制、边缘裂纹的检查这些环节都要制定专门的标准,这就对检测设备的精度有了更高要求。因为砷化镓衬底的直径不像硅片那样可以一直增大,所以现在主要还是用4英寸和6英寸的,那么标准化体系就得在尺寸提升受限制的情况下,通过更为严格的工艺准则来保证器件的一致性。

3 第三代半导体材料的标准化进展

3.1 碳化硅在功率电子中的标准构建

碳化硅的击穿场强高达2.5MV/cm,约为硅的8倍;其热导率则是硅的3倍,耐温可达到600摄氏度,适合应用于新能源汽车、特高压输电等高电压大功率的场景之中。特斯拉Model3搭载标准化碳化硅MOSFET模块以后,电源转换所造成的损耗缩减了70%,逆变器的体积减小了40%,续航里程得以加强5%。碳化硅实现标准化的核心难题在于对微管瑕疵的把控。SEMI79规定衬底的微管密度要低于 0.1cm^{-2} ,避免在大功率工作状态下出现电击穿现象。当前,6英寸的碳化硅衬底仍是市场上的主要存在,而8英寸衬底的标准大概会在2026年出台,这会促使碳化硅器件的成本削减超过30%。

3.2 氮化镓在5G与快充中的应用标准

氮化镓属于纤锌矿结构,其禁带宽度为3.39eV,电子饱和漂移速度高达 $2.5 \times 10^7\text{cm/s}$,开关频率达到兆赫兹级别,这明显优于硅基器件。由于氮化镓单晶的生长存在较大困难,所以当前主要采取异质外延法。SEMI75标准要求外延层与衬底的晶格失配率不超过0.1%。消费电子领域的快充技术重点关注动态电阻检测,而JEDECJEP183标准则针对氮化镓HEMT的静态参数检测制定了规范。对于5G基站而言,高温稳定性更为关键:AEC-Q102标准对它的要求比硅基器件严格两倍。我国GB/T42766-2023已经明确了外延层厚度均匀性、表面缺陷密度等指标。

3.3 超宽禁带材料的预研标准布局

氧化镓、金刚石这些超宽禁带半导体是下一代功率器件的候选材料,它们的禁带宽度分别是4.8eV和5.5eV,从理论上来说其性能要比碳化硅和氮化镓更好。2024年日本NovelCrystalTechnology公司公布了其首个氧化镓衬底企业标准,该标准要求位错密度小于 10^4cm^{-2} ,这表明超宽禁带材料渐渐步入标准化进程。我国中国科学院半导体研究所、西安电子科技大学等单位正在联手制定相关团体标准,预计到2026年就能出台首个国家标准。要推动超宽禁带材料实现标准化,就得预先安排好生长缺陷评判、热特性检测、可靠性确认等事宜,才能在将来的产业竞争中占据技术高地。

3.4 第三代半导体封装与可靠性标准

第三代半导体具备高温高频特性,这给封装材料及可靠性带来新要求。碳化硅器件的结温可达到 200°C 以上,传统

硅基封装材料和互连工艺很难满足长期稳定性需求。国际标准AEC-Q101针对宽禁带器件增添了高温反向偏压、温度循环等严格的检测项目。我国于2024年出台的T/CSTM00876-2024标准首次对碳化硅与铜基板的热适应性实施规范，热膨胀系数的差别需控制在30%以内。封装可靠性标准要应对银烧结、铜线键合等新型互连工艺的评价办法。当下国内外均处在标准追赶进程之中，迫切须要形成系统的可靠性考量体系。

4 我国半导体材料标准化短板与对策

4.1 国际标准化组织分工与我国参与现状

全球半导体材料标准主要由SEMI、IEC和JEDEC这三大组织来主导。其中，SEMI牵涉材料、设备以及工艺在内的全产业链，其发布材料标准数量超过1000项，具备很高的全球采纳率。IEC关注电气性能与安全方面的问题，而JEDEC则着重于存储器、分立器件的标准化工作。这三个组织之间存在相互弥补的态势。不过，我国参与制定的半导体材料国际标准所占比例仅为全球的3%，大多时候都是对国际标准加以修改采用，并没有太多自己原创的标准。即便到了2024年，我国也才刚刚开始制订自己的第一个关于碳化硅外延层厚度检测方面的国际标准，但是有关核心材料的规则制定仍然缺乏话语权。这种消极应对的情况极大地影响到本国产业在国际市场上的竞争能力。

4.2 我国标准覆盖率与先进性不足分析

我国半导体材料标准化存在三个明显问题。其一为标准覆盖率低：第三代半导体领域仅覆盖材料制备的30%，封装、可靠性、应用端的标准缺失较为严重。碳化硅领域，我国有12项相关标准，而SEMI则有37项。其二为标准先进性差：我国国家标准的平均更新时间为5到8年，SEMI仅为2到3年；12英寸硅片表面金属污染标准，我国采用的是2018年的版本，SEMI在2023年已经把指标收紧了50%。其三为检测设备国产化率低，不足10%，造成标准执行要依靠进口设备，从而产生标准和装备两方面的依赖。

4.3 自主可控的标准化替代路径建议

我国要弥补短板，需从三个方面创建自主可控的标准体系。其一，完善“标准先行”制度。其二，推动三安光电、天科合达、

沪硅产业这些头部企业参与国家标准的制订；对于带头制订国际标准的企业，给予最高达500万元的奖励。其三，形成质量溯源体系，并搭建半导体材料数字护照系统，把杂质含量、工艺参数上传存证。参照国际认证，引导国产厂商申请AEC-Q101之类的车规认证，天岳先进已经经过认证并进入博世供应链，这给国产材料走向世界给予了范例。还要预先布局超宽禁带材料标准，从而占据下一代技术的制高点。

5 结语

半导体材料的发展历程体现着人类冲破物理界限的过程，从硅基文明过渡到宽禁带时期，标准化一直是该行业发展的关键引导因素。它解决了大规模生产中的适配难题，也是技术路线及市场份额竞争中的重要手段。我国半导体材料产业正在由“跟跑者”变成“并行者”，只有创建起科学、系统而且具有前瞻性的标准化体系，实现技术研发、标准制订以及产业应用之间的协同发展，才能在将来关于芯片主权的竞争当中占得先机。当前，我国在标准覆盖范围、先进程度以及国际化水平上存在较大差距，迫切需要通过政策奖励、数字追踪和参照国际标准这三条途径来共同推动，从而做到半导体材料产业的自主可控。

[参考文献]

- [1]李素青.碳化硅材料发展现状及标准体系分析[J].中国金属通报,2024,(11):1-4.
- [2]朱逸慧.2022年度全国半导体材料标准工作年会胜利召开[J].中国有色金属,2023,(06):21.
- [3]孙朝宁,贺光辉,赵振博,等.半导体材料国内外标准研究进展[J].中国标准化,2021,(15):132-135+146.
- [4]姬国栋.全国半导体材料标准暨技术研讨会在江苏如皋召开[J].中国有色金属,2021,(13):21.
- [5]杨素心.半导体材料领域国内标准现状及发展方向分析[J].世界有色金属,2020,(14):154-156.

作者简介：

李梦洋(2007--),女,汉族,河北省石家庄市人,大学本科,研究方向：半导体材料。