

国内外碳化硅标准比对分析

李 景¹ 黄 佳^{2*} 李国鹏³ 孙红军¹

(1.中国标准化研究院; 2.中国计量大学; 3.中国科学院科技战略咨询研究院)

摘 要: 为了探明碳化硅国内外标准的情况和差异, 本文调研、分析并选择了中国国家标准和行业标准、国际标准及美国、欧洲、日本、俄罗斯、罗马尼亚相关标准, 选择碳化硅物理特性、碳化硅磨料化学分析方法、含碳化硅耐火材料化学分析方法、碳化硅晶片产品规格进行标准比对。通过比对, 得出结论: (1) 国外有关碳化硅标准, 都制定了碳化硅产品的理化性能标准, 有些指标我国国家标准和部分企业实际质量控制中未列入检测控制指标, 如: 振实密度、比表面积、清洁度、韧性、电导率; (2) 针对碳化硅粒度砂与微粉产品, 发达国家根据其用途不同, 按照对口专用、精密化、综合利用原则, 分成了多种牌号专用产品, 专用产品的企业标准指标要求也不同, 使生产者和使用者找到了最佳结合点, 产品产生了最大效益; (3) 从碳化硅磨料的化学分析方法标准比对和含碳化硅耐火材料化学分析方法标准比对结果看, 我国国家标准的比对指标相较于美国、欧盟及日本等发达国家及地区而言较为完整; (4) 从碳化硅晶片产品相关标准比对结果看, 我国国家标准对碳化硅单晶抛光片以及晶片检测方面制定了相关标准, 而美国、欧盟、日本等发达国家及地区没有涉及。针对碳化硅外延片表面缺陷的测试环境, 我国国家标准相较于欧盟以及日本标准要求更高。

关键词: 碳化硅, 标准, 标准比对, 中国国家标准 (GB)

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2024.01.015

Comparative Analysis of Domestic and Foreign Silicon Carbide Standards

LI Jing¹ HUANG Jia^{2*} LI Guo-peng³ SUN Hong-jun¹

(1. China National Institute of Standardization; 2. China Jiliang University;
3. Institute of Science and Development, China Academy of Sciences)

Abstract: In order to explore the situation and differences between domestic and foreign standards for silicon carbide, this paper investigates, analyzes, and selects Chinese national and sectoral standards, international standards, relevant standards from the United States, Europe, Japan, Russia, and Romania. The physical properties of SiC, chemical analysis methods for SiC abrasives, chemical analysis methods for refractory materials containing SiC, and product specifications for SiC wafers are selected for standards comparison. Through comparison, it can be concluded that: (1) There are foreign standards for the physical and chemical properties of silicon carbide products. Some indicators, such as vibration density, specific surface area, cleanliness, toughness, and conductivity, are not included in the national standards and actual quality control of some enterprises in China; (2) Developed countries have divided silicon carbide sand and micro powder products into multiple brand specific products based on their different uses and the principles of matching, specialized, precision, and comprehensive

基金项目: 本文受外交部亚洲合作资金项目“亚太经合组织标准数字化互联互通平台研究”(项目编号: 25A0002-2023)资助。

作者简介: 李景, 研究馆员, 博士, 主要从事标准文献工作和标准化研究。

黄佳, 通信作者, 博士, 中国计量大学经济与管理学院副教授, 研究方向为质量管理与标准化工程。

李国鹏, 创新副研究员, 硕士, 从事知识图谱构建和大数据研究工作。

孙红军, 博士, 副研究员, 研究方向为标准对比、标准数字化、标准走出去。

utilization. The enterprise standard index requirements for specific products are also different, which provides producers and users with the best combination point and maximizes the benefits of the products; (3) From the comparison results of chemical analysis methods for silicon carbide abrasives and refractory materials containing silicon carbide, it can be seen that the comparison indicators of China's national standards are relatively complete compared to the ones of developed countries such as the United States, the European Union, and Japan; (4) From the comparison results of relevant standards for silicon carbide wafer products, it can be seen that China have developed relevant national standards for silicon carbide single crystal polishing wafers and wafer testing, while the standards of developed countries such as the United States, the European Union, and Japan do not include them. In terms of the testing environment for surface defects of silicon carbide epitaxial wafers, China's national standards have higher requirements compared to European Union and Japanese standards.

Keywords: SiC, standards, standards comparison, GB

0 引言

碳化硅具有禁带宽度大、热导率高、电子饱和漂移速率大、临界击穿电场高、介电常数低及化学稳定性好等诸多优点,是具有广阔发展潜力的第三代新型半导体材料。碳化硅晶片和外延衬底主要用于制造功率器件、射频器件等分立器件,可广泛应用于新能源汽车、5G通信、光伏发电、轨道交通、智能电网、航空航天等现代工业领域,在我国“新基建”的各主要领域中发挥重要作用。我国政府高度重视以碳化硅为代表的第三代半导体材料的研发,其中第三代半导体被纳入关键战略材料发展重点。

2021年3月13日,新华网刊登了《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》,其中“集成电路”领域,特别提出碳化硅、氮化镓等宽禁带半导体要取得发展。

碳化硅和氮化镓都属于第三代半导体宽禁带半导体材料,能够在“十四五规划”中提名,足以说明其重要程度已经上升到了国家的层面。相信在国家的助推下,国内将迅速形成适合第三代半导体发展的环境,前景十分值得期待^[1]。

另一方面,碳化硅对于提振地方经济意义重大。例如:作为“十四五”时期要全力打造“碳化硅”作为拳头型产品的山西省,在《山西省“十四五”新产品发展规划》中提到:推进6英寸及以上砷化镓、碳化硅等第二/三代半导体材料和蓝宝石材料大规模产业化,开展碳基半导体等新型材料基础研究。可以看出,碳化硅是山西省“十四五”期间重点发展

的产品。因此,对比我国与美国、日本、欧洲等发达国家及地区碳化硅产品标准,分析我国碳化硅标准的先进与不足之处,借鉴和引用发达国家的先进经验和技术标准,对于提升山西省碳化硅质量,促进山西省碳化硅产业转型升级具有重要的意义。

本论文旨在通过对比我国与美国、日本、欧洲等发达国家及地区碳化硅产品标准,分析我国碳化硅标准的先进与不足之处。研究内容包括:(1)检索并收集国内外现行的碳化硅相关标准;(2)对收集的碳化硅相关标准进行归类分析;(3)确定比对的分析对象:碳化硅物理特性、碳化硅磨料的化学分析方法、含碳化硅耐火材料化学分析方法以及碳化硅晶片;(4)对比对结果进行分析,得出结论。

1 国内外碳化硅产品概况

1.1 碳化硅产品介绍

碳化硅(又称之金刚砂或耐火砂),化学式为SiC,是用石英砂、石油焦(或煤焦)、木屑(生产绿色碳化硅时需要加食盐)等原料通过电阻炉高温冶炼而成的一种无机物^[2]。碳化硅在大自然中存在于罕见的矿物莫桑石中。在C、N、B等非氧化物高技术耐火原料中,碳化硅为应用最广泛、最经济的一种。碳化硅有黑碳化硅和绿碳化硅两个常用的基本品种,都属 α -SiC。其中:(1)黑碳化硅含SiC约95%,其韧性高于绿碳化硅,大多用于加工抗张强度低的材料,如:玻璃、陶瓷、石材、耐火材料、铸铁和有色金属等;(2)绿碳化硅含SiC约97%以上,自锐性好,大多用于加工硬质合金、钛合金和光学玻璃,也

用于珩磨汽缸套和精磨高速钢刀具。此外还有立方碳化硅,它是以特殊工艺制取的黄绿色晶体,制作的磨具适用于轴承的超精加工,可使表面粗糙度从Ra32~0.16微米一次加工到Ra0.04~0.02微米^[3]。

碳化硅在禁带宽度、击穿电场强度、饱和电子漂移速率、热导率以及抗辐射等关键参数方面具有显著优势,进一步满足了现代工业对高功率、高电压、高频率的需求。以碳化硅为衬底制成的功率器件相比硅基功率器件具有优越的电气性能,可以满足电力电子技术对高温、高功率、高压、高频及抗辐射等恶劣工作条件的新要求,从而成为半导体材料领域最具前景的材料之一。未来,以碳化硅(SiC)为代表的第三代宽禁带半导体将成为半导体产业升级的关键。

1.2 碳化硅产业国内概况

碳化硅(SiC)作为第三代半导体材料的典型代表,与第一代半导体材料硅(Si)相比,拥有更加优异的物理化学特性,使得碳化硅器件能降低能耗20%以上、减少体积和重量30%~50%,降低碳排放量20%以上,实现电力电子系统的高效化、小型化、轻量化和低耗化。因此,碳化硅电力电子器件将广泛应用于电动汽车、轨道交通、智能电网、通信雷达和航空航天等重要国民经济和军工领域。国际上部分国家在该领域起步早,6英寸碳化硅衬底已经量产,8英寸已研制成功。而国内以4英寸为主,6英寸尚处在攻关阶段。我国碳化硅单晶衬底材料长期依赖进口,其高昂的售价和不稳定的供货情况大大限制了国内相关行业的发展。目前,中国有碳化硅冶炼企业200多家,年生产能力220多万吨(其中:绿碳化硅块120多万吨,黑碳化硅块约100万吨);加工制砂、微粉生产企业300多家,年生产能力200多万吨^[4],国内碳化硅产业厂商见表1。

表1 SiC产业链国内厂商情况^[5]

衬底	外延	设计	制造	IDM模式
天科合达 山东天岳 河北网光 世纪金光 中科钢研	翰天天成 东莞天城 世纪金光 Norstel	瞻芯电子 苏州锘威特 基本半导体	三安集成	秦科天润 中车时代 扬杰电子 瑞能半导体 中电科 华润微

2018年,山西省政府与中电科集团达成战略合作关系,展开全方位合作。通过吸引上游企业,形成产业聚集效应,打造电子装备制造、三代半导体产业生态链,建成国内最大的碳化硅材料供应基地。

中国电科(山西)电子信息科技创新产业园项目包括“一个中心、三个基地”:“一个中心”即中国电科(山西)三代半导体技术创新中心;“三个基地”即中国电科(山西)碳化硅材料产业基地、中国电科(山西)电子装备智能制造产业基地、中国电科(山西)能源产业基地。这个1000亩的产业园将串联起山西转型综改示范区上下游十多个产业,带动山西半导体产业集群迅速发展,实现中国碳化硅的完全自主供应。其中,中国电科(山西)碳化硅产业基地一期项目建筑面积2.7万平方米,能容纳600台碳化硅单晶生产炉和18万片N型晶片的加工检测能力,可形成7.5万片的碳化硅晶片产能,基地的粉料合成设备、单晶生长设备都是自主研发生产的全国产化设备。2020年,碳化硅晶片产量达3万余片,市场占有率超过50%,公司实现产值27,986万元;2021年,投资大力提升车间的智能化水平,建设基于5G技术的智能化、数字化车间,各个生产环节的技术参数在中控室一屏可视。该项目目前成为中国前三、世界前十的碳化硅生产企业,可实现年产值10亿元。

1.3 碳化硅产业国外概况

受新能源汽车、工业电源等应用的推动,全球电力电子碳化硅的市场规模不断增长,2020年的市场规模达6亿美元。在竞争格局方面,行业龙头企业的经营模式以IDM模式为主,主要的市场份额被Infineon、Cree、罗姆以及意法半导体占据,国内外厂商的竞争差距较大。

在半导体应用中,SiC主要用于电力电子器件的制造。从SiC器件制造流程顺序来看,SiC器件的制造成本中衬底、外延的成本占比最大,其中SiC衬底成本占比50%,SiC外延的成本占比25%,这两大工序是SiC器件的重要组成部分。在上游原料供应方面,高纯石英砂是碳化硅的主要原料之一。因高纯石英砂的制备成本高、加工工艺要求高,因此目前全球具备批量生产高纯石英砂的厂商较少,如

表2所示。从下游需求情况来看,2018–2019年,受新能源汽车、工业电源等应用的推动,全球电力电子碳化硅的市场规模从4.3亿美元增长至5.64亿美元,2020年的市场规模超过6亿美元。

表2 国内外生产高纯石英砂龙头企业^[6]

公司名称	行业地位	市场分布
美国尤尼明	全球最大高纯石英砂制造商	北美、欧洲、亚太
挪威The Quartz Corporation	全球第二批量化生产高纯石英砂制造商	欧洲等
中国石英股份	国内生产高纯石英砂龙头企业	中国、欧盟、日本、韩国

从全球碳化硅衬底的企业经营情况来看,2018年美国CREE公司占龙头地位,市场份额达62%,其次是美国II–VI公司,市场份额约为16%。总体来看,在碳化硅市场中,美国厂商占据主要地位(详见表3)。

表3 SiC产业链国外厂商情况^[5]

衬底	外延	设计	制造	IDM模式
Cree 道康宁 Rohm II–VI 新日铁	Cree 道康宁 Rohm Novasic 邵和电工	USCi Bruckewell CISSOIM	SUNY Ploy 离子束 X–Fab 韩磊科技	Cree Onsemi Infineon ST Rohm 三菱电机

2 国内外碳化硅产品标准化概况

碳化硅作为一种化学成分较为单一的无机化工原料,其相关的产品标准较少,多为碳化硅的化学分析标准及检测标准。目前现行的国内外碳化硅产品标准有GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》^[2],GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》和SR 5064《碳化硅》。

2.1 我国碳化硅产品标准化概况

中国目前已基本建成了一套由国家标准、行业标准和地方标准组成的碳化硅标准体系。目前现行的碳化硅相关国家标准共24项,行业标准共38项,地方标准共3项。我国第一部碳化硅标准为GB 2480《碳化硅 技术条件》,该强制性标准于1984年1月1日实施。GB 2480的第一次修订版本于1997年2月1日实施,并转化为推荐性标准GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》。2008年6月3日,第二次修订的GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》发布,并于2009年1月1日

实施,该标准与GB/T 2480相比,对各牌号产品的SiC、F.C、Fe₂O₃含量指标和铁合金粒含量粒度段的划分进行了调整,增加了黑碳化硅微粉产品的化学成分指标,以及对检验规则进行了改动等。

我国现行的碳化硅产品技术标准只有1个,即GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》;磨料粒度及其组成、磨料粒度组成测定方法有:GB/T 2481.2《固结磨具用磨料 粒度组成的检测和标记 第2部分:微粉》^[9],GB/T 9258.1《涂附磨具用磨料 粒度分析 第1部分:粒度组成》,GB/T 9258.2《涂附磨具用磨料 粒度分析 第2部分:粗磨粒P12~P220粒度组成的测定》^[10]和GB/T 9258.3《涂附磨具用磨料 粒度分析 第3部分:微粉P240~P2500粒度组成的测定》等;此外,化学分析及检测方法相关标准有:GB/T 3045《普通磨料 碳化硅化学分析方法》,GB/T 16555《含碳、碳化硅、氮化物耐火材料化学分析方法》,GB/T 37254《高纯碳化硅 微量元素的测定》,JB/T 5204《碳化硅脱氧剂化学分析方法》以及JC/T 2149《高纯碳化硅粉体成分分析方法》。

2.2 国外碳化硅产品标准化概况

目前,世界大多数发达国家市场经济运行了较长时期,法律法规健全,竞争机制规范,常依靠买卖双方合同约定,只对涉及碳化硅产品间配合/配套的术语、代号、尺寸公差、粒度标号/粒度分布和各项质量性能指标的测试分析方法制定国家标准或者协会标准。从国外发达国家与组织碳化硅及其制品标准制定情况来看,国际标准化组织(ISO)现行的碳化硅及其制品相关标准共有6项;美国现行的碳化硅相关标准共有14项;欧洲现行的碳化硅相关标准共有49项;日本现行的碳化硅相关标准共有5项;俄罗斯现行的碳化硅相关标准共有8项。

现行的国外碳化硅相关产品标准有2个,即罗马尼亚标准SR 5064《碳化硅》和俄罗斯标准GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》。此外,国际标准化组织/小型工具技术委员会/砂轮和磨料分委员会(ISO/TC29/SC5)于1997年1月15日发布实施了ISO 9286《磨粒与磨料—碳化硅化学分析》。美国国家标准学会(ANSI)于1992年12月23日批准通过ANSI B74.15《碳化硅磨料粒和天然磨料的化学分析方

法》。日本工业标准委员会（JISC）于1998年11月20日审议通过了JIS R6124《碳化硅磨料的化学分析方法》。韩国知识经济部技术标准院于2003年10月31日修订通过了KS L 6510《碳化硅磨料的化学分析方法》。ISO没有给出碳化硅的分类标准；美国ASTM对纤维增强碳化硅的复合结构给出了分类标准ASTM C1835《纤维增强碳化硅-碳化硅（SiC-SiC）复合结构的标准分类》；俄罗斯对纤维增强碳化硅复合材料也给出了分类标准GOST R58016《陶瓷复合材料 碳化硅纤维增强碳化硅复合材料 分类》。截至目前，我国还没有碳化硅相关的分类标准。

3 国内外碳化硅产品标准比对研究

目前中国电科（山西）碳化硅材料产业基地实施的国内标准有GB/T 30656《碳化硅单晶抛光片》；碳化硅晶片检测方面的标准有：GB/T 32278《碳化硅单晶片平整度测试方法》、GB/T 30866《碳化硅单晶片直径测试方法》、GB/T 37254《高纯碳化硅 微量元素的测定》、GB/T 30867《碳化硅晶片厚度和总厚度变化测试方法》、GB/T 30868《碳化硅晶片微管密度的测定 化学腐蚀法》。虽然山西企业目前无已批准的标准，但在2021年6月公司申请了3项标准，企业标准补充了国标及行业标准在某些方面的缺失。尤其在测试方法，相关参数要求方面严于国家标准及行业标准。

3.1 可比对的碳化硅国内外标准

通过碳化硅产品相关标准的收集与分析，表4~表7列出了国内外可比对的标准。

表4 碳化硅物理特性标准比对

序号	比对标准
1	GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》
2	GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》
3	SR 5064《碳化硅》

表5 碳化硅磨料的化学分析方法标准比对

序号	比对标准
1	GB/T 3045《普通磨料 碳化硅化学分析方法》
2	ANSI B74.15《碳化硅磨粒与磨料的化学分析方法》
3	ISO 9286《磨粒与磨料-碳化硅化学分析》
4	JIS R6124《碳化硅磨料的化学分析方法》
5	KS L 6510《碳化硅磨料的化学分析方法》

表6 含碳化硅耐火材料化学分析方法标准比对

序号	比对标准
1	GB/T 16555《含碳、碳化硅、氮化物耐火材料化学分析方法》
2	ISO 21068-2《含碳化硅的原材料和耐火制品的化学分析 第2部分：烧失量、总碳、游离碳和碳化硅、总二氧化硅和游离二氧化硅及总硅和游离硅减少的测定》
3	EN 12698-1《氮化物结合碳化硅耐火材料的化学分析 第1部分：化学法》
4	EN 12698-2《氮化物结合碳化硅耐火材料的化学分析 第2部分：X射线衍射(XRD)法》

表7 碳化硅晶片标准比对

序号	比对标准
1	SJ 21493《碳化硅外延片表面缺陷测试方法》
2	T/IAWBS 002《碳化硅外延片表面缺陷测试方法》
3	IEC 63068-2《半导体器件—动力器件用碳化硅同质外延晶片缺陷的无损识别准则 第2部分：光学检查法识别缺陷的试验方法》
4	IEC 63068-3《半导体器件—动力器件用碳化硅同质外延晶片缺陷的无损识别准则 第3部分：使用光致发光缺陷的测试方法》
5	JEITA EDR-4712/200《SiC晶片晶体缺陷的无损检测方法 第2部分：利用光学检测技术检测SiC外延层缺陷的方法》
6	JEITA EDR-4712/300《SiC晶片晶体缺陷的无损检测方法 第3部分：利用光致发光法检查SiC外延层缺陷的方法》

3.2 碳化硅产品关键指标比对

3.2.1 碳化硅物理特性标准比对

我国现执行的碳化硅产品技术条件国家标准为GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》，根据不同用途分牌号规定了粒度组成、化学成分、磁性物含量、铁合金粒、密度等项目。俄罗斯国家标准委员会于1984年11月1日发布了碳化硅磨料的技术条件国家标准GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》，规定了绿碳化硅磨料和黑碳化硅磨料的相关技术水平指标，包括粒度组成、化学成分、磁性物含量、密度、粉化率等项目。罗马尼亚标准协会（ASRO）发布的国家标准SR 5064《碳化硅》，对碳化硅的类型、物理化学特性、体积密度等项目做了规定。

（1）碳化硅的分类

中国工业生产的碳化硅主要是黑色碳化硅（SiC含量约95%）和绿色碳化硅（SiC含量约97%以上）两种。GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》将磨料碳

化硅分为陶瓷结合剂磨具、砂带用黑碳化硅；陶瓷结合剂磨具、砂带用绿碳化硅；有机结合剂磨具用黑碳化硅；有机结合剂磨具用绿碳化硅；手工打磨的砂页用黑碳化硅；手工打磨的砂页用绿碳化硅。

俄罗斯国家标准GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》对碳化硅磨料分为绿色碳化硅和黑色碳化硅两种，其质量等级和粒度分类具体见表8。

表8 俄罗斯GOST标准对碳化硅的分类

碳化硅类别	质量等级		粒度
	细粒	基本粒	
绿色	64C	63C	从63-Π, H到6-Π, H; 从M63-Π, H到M5-Π, H
黑色	54C	53C	从160-H到6-H

罗马尼亚国家标准SR 5064《碳化硅》根据颜色将碳化硅分为绿色碳化硅(GC)和黑色碳化硅(BC);根据碳化硅含量(SiC)分为优质碳化硅

(S)和普通碳化硅(N)。

(2) 化学成分分析比对

GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》根据不同种类的磨料碳化硅做了化学成分规定,见表9。

GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》对碳化硅磨料的化学成分做了规定,见表11。

根据SR 5064《碳化硅》,不同种类的碳化硅化学成分见表12。

(3) 密度比对

GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》对碳化硅磨料的体积密度规定见表14。

GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》和SR 5064《碳化硅》对碳化硅磨料的体积密度规定见表15。

(4) 磁性物含量比对

GB/T 2480《普通磨料 碳化硅》对碳化硅磁性

表9 陶瓷结合剂磨具、砂带用碳化硅磨料的化学成分

牌号	粒度范围	化学成分/%		
		SiC不少于	F.C不多于	Fe ₂ O ₃ 不多于
陶瓷结合剂磨具、砂带用黑碳化硅	F4 ~ F90	98.6	0.2	0.4
	P12 ~ P100			
	F100 ~ F150	98.1	0.25	0.5
	P120 ~ P150			
	F180 ~ F220	97.2	0.3	0.55
	P180 ~ P220			
	F230 ~ F280	97.2	0.3	0.55
	P240 ~ P360			
	F320 ~ F500	97	0.35	0.6
	P400 ~ P1000			
	F600 ~ F800	96.5	0.4	0.6
	P1200 ~ P1500			
	F1000 ~ F1200	95.5	0.5	0.7
	P2000 ~ P2500			
陶瓷结合剂磨具、砂带用绿碳化硅	F4 ~ F90	99.1	0.2	0.2
	P12 ~ P100			
	F100 ~ F150	98.6	0.25	0.45
	P120 ~ P150			
	F180 ~ F220	98	0.25	0.5
	P180 ~ P220			
	F230 ~ F280	98	0.3	0.5
	P240 ~ P360			
	F320 ~ F500	97.5	0.3	0.5
	P400 ~ P1000			
	F600 ~ F800	97	0.35	0.5
	P1200 ~ P1500			
	F1000 ~ F1200	96.5	0.4	0.5
	P2000 ~ P2500			

表10 有机结合剂磨具、手动打磨的砂页用碳化硅磨料的化学成分

牌号	粒度范围	化学成分/%		
		SiC不少于	F.C不多于	Fe ₂ O ₃ 不多于
有机结合剂磨具及手工打磨的砂页用黑碳化硅	F4 ~ F90	98.1	0.25	0.5
	P12 ~ P100			
	F100 ~ F150	97.6	0.3	0.6
	P120 ~ P150			
	F180 ~ F220	96.7	0.35	0.65
	P180 ~ P220			
	F230 ~ F280	96.7	0.35	0.65
	P240 ~ P360			
	F320 ~ F500	96.5	0.4	0.7
	P400 ~ P1000			
	F600 ~ F800	96	0.45	0.7
	P1200 ~ P1500			
	F1000 ~ F1200	95	0.55	0.8
	P2000 ~ P2500			
有机结合剂磨具及手工打磨的砂页用绿碳化硅	F4 ~ F90	98.6	0.25	0.25
	P12 ~ P100			
	F100 ~ F150	98.1	0.3	0.5
	P120 ~ P150			
	F180 ~ F220	97.5	0.3	0.6
	P180 ~ P220			
	F230 ~ F280	97.5	0.35	0.6
	P240 ~ P360			
	F320 ~ F500	97.5	0.35	0.6
	P400 ~ P1000			
	F600 ~ F800	96.5	0.4	0.65
	P1200 ~ P1500			
	F1000 ~ F1200	96	0.45	0.65
	P2000 ~ P2500			

表11 俄罗斯GOST标准对碳化硅磨料化学成分的规定

等级	粒度	化学成分%		
		SiC不少于	铁不多于	碳不多于
细粒绿碳化硅	63—16	98.8	0.12	0.3
	12, 10	98.5	0.15	0.4
	8, 6		0.2	
	M63, M50	99	0.15	
	M40—M14	98	0.2	
	M10—M5	97	0.25	
基本粒绿碳化硅	63—16	98.5	0.25	0.3
	12, 10	98	0.3	0.4
	8, 6	97.5	0.4	
	M63, M50	98	0.3	
	M40—M14	97	0.4	
	M10—M5	96		
细粒黑碳化硅	160—63	97.5	0.3	0.3
	50—16	98		
	12, 10	97	0.6	0.4
	8, 6	96.5		
基本粒黑碳化硅	160—63	97	0.4	
	50—16	97.5		
	12, 10	96.5	0.7	
	8, 6	95.5	1.4	

表12 罗马尼亚SR标准对碳化硅化学成分的规定

等级	造粒		化学成分%		
	STAS 1753/1.2	STAS 12289	SiC不少于	Fe ₂ O ₃ 不多于	C不多于
优质绿色碳化硅	160—63	12—30	—	—	—
	50—16	36—80	98.8	0.12	0.3
	12—10	100; 120	98.5	0.15	0.4
	8; 6	150; 180		0.2	
	F220—F240	P240	99	0.15	
	F280—F500	P280—P1200	98	0.2	
	F600—F1200	—	97	0.25	
普通绿色碳化硅	160—63	12—30	—	—	—
	50—16	36—80	98.5	0.25	0.3
	12—10	100; 120	98	0.3	0.4
	8; 6	150; 180	97.5	0.4	
	F220—F240	P240	98	0.3	
	F280—F500	P280—P1200	97	0.4	
	F600—F1200	—	96		
优质黑色碳化硅	160—63	12—0	97.5	0.3	0.3
	50—16	36—80	98		
	12—10	100; 120	97	0.4	0.4
	8; 6	150; 180	96.5		
	F220—F240	P240	98	0.3	
	F280—F500	P280—P1200	97	0.4	
	F600—F1200	—	—	—	
普通黑色碳化硅	160—63	12—30	97	0.4	0.4
	50—16	36—80	97.5		
	12—10	100; 120	96.5	1.7	
	8; 6	150; 180	95.5	1.4	
	F220—F240	P240	97.5	0.4	
	F280—F500	P280—P1200	96	0.6	
	F600—F1200	—	—	—	

物含量做出的规定见表16。

表13 中国国家标准GB与日本JIS、俄罗斯GOST标准绿

碳化硅化学成分对比

国家	粒度范围	SiC不小 于 (%)	F.C不多 于 (%)	Fe ₂ O ₃ 不多 于 (%)
中国GB	F4~F90;P12~P100	99.10	0.20	0.20
日本JIS	8#~220#	98.0	—	—
俄罗斯 GOST	10#;12#	98.0	0.4	(Fe) 0.3
中国GB	F320~F500;P400	97.5	0.30	0.50
日本JIS	240#~3000#	96.0	—	—
俄罗斯 GOST	M40~M14	98.0	0.4	(Fe) 0.2

表14 我国国家标准对碳化硅磨料的体积密度的规定

粒度	绿碳化硅密度不少于 g/cm ³	黑碳化硅不少于g/ cm ³
F4 ~ F220 (P12 ~ P220)	3.18	3.12
F220 (P220)	3.15	3.10

表16 我国国家标准对碳化硅磨料磁性物含量的规定

粒度范围		磁性物含量/%不多于	
		陶瓷结合剂磨 具、砂带用	有机结合剂磨具、 手工打磨的砂页用
黑碳 化硅	F4 ~ F30	0.03	0.075
	P12 ~ P30		
	F36 ~ F60	0.025	0.065
	P36 ~ P60		
	F70 ~ F120	0.02	0.055
	P80 ~ P150		
	F150 ~ F220	0.015	0.035
	P180 ~ P220		
绿碳 化硅	F4 ~ F30	0.02	0.035
	P12 ~ P30		
	F36 ~ F60	0.017	0.03
	P36 ~ P60		
	F70 ~ F120	0.015	0.025
	P80 ~ P150		
	F150 ~ F220	0.012	0.02
	P180 ~ P220		

表15 俄罗斯GOST标准和罗马尼亚SR标准对碳化硅磨料的体积密度的规定

粒度	体积密度g/cm ³ ，不低于		
	GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》		SR 5064《碳化硅》
	绿碳化硅	黑碳化硅	研磨剂生产用碳化硅
200			1.34—1.44
160		1.41； 1.34*	1.36—1.46
125		1.41； 1.35*	1.41—1.51
100		1.43； 1.39*	1.42—1.52
80		1.41	1.43—1.53
63	1.49	1.43	1.44—1.54
50			1.46—1.56
40			1.45—1.55
32	1.48	1.41	1.45—1.55
25	1.46	1.39	1.45—1.55
20	1.44	1.37	1.44—1.54
16	1.41	1.35	1.43—1.53
12	1.35	1.33	1.45—1.55
10	1.35	1.31	1.39—1.49
8	1.34	1.29	1.34—1.44
6	1.27	1.27	1.31—1.36

GOST 26327《碳化硅磨料 技术规范》对磁性材料的含量规定见表17。

SR 5064《碳化硅》碳化硅磁性材料的含量规定见表18。

表17 俄罗斯GOST标准碳化硅磨料磁性材料的含量规定

类别		磁性材料的含量不超过%
细粒绿碳化硅		0.05
基本粒绿碳化硅		0.15
细粒黑碳化硅	粒度为160—16	0.1
	粒度为12—6	0.2
基本粒黑碳化硅		0.3

表18 罗马尼亚SR标准碳化硅磨料磁性材料的含量规定

类别	造粒		磁性材料的含量不超过%
	STAS 1753/1.2	STAS 12289	
优质绿色碳化硅	160—16	12—30	0.05
	12—6	36—180	
普通绿色碳化硅	160—16	12—30	0.1
	12—6	36—180	
优质黑色碳化硅	160—16	12—30	0.2
	12—6	36—180	0.3
普通黑色碳化硅	160—16	12—30	0.3
	12—6	36—180	

3.2.2 碳化硅磨料的化学分析方法标准比对

我国GB/T 3045《普通磨料 碳化硅化学分析方法》规定了表面杂质分析以及磨料及结晶块中碳化硅含量的间接法测定；美国国家标准ANSI B74.15

《碳化硅磨粒与磨料的化学分析方法》规定了磨料中碳化硅的测定以及其他杂质的化学分析；国际标准化组织ISO 9286《磨粒与磨料—碳化硅化学分析》规定了表面杂质分析和碳化硅碎片中碳化硅的测定；日本工业标准JIS R6124《碳化硅磨料的化学分析方法》规定了表面杂质分析和荧光X射线分析方法；此外，韩国KS L 6510《碳化硅磨料的化学分析方法》规定了碳化硅磨料的化学分析方法和荧光X射线分析方法。具体分析方法见表19。

3.2.3 含碳化硅耐火材料化学分析方法标准比对

我国于2017年9月7日发布GB/T 16555《含碳、碳化硅、氮化物耐火材料化学分析方法》^[13]。国际标准化组织ISO于2008年8月1日发布了ISO 21068-2《含碳化硅的原材料和耐火制品的化学分析 第2部分：烧失量、总碳、游离碳和碳化硅、总二氧化硅和游离二氧化硅及总硅和游离硅的测定》。欧洲标准化委员会分别于2007年4月30日和5月31日发布了EN 12698-1《氮化物结合碳化硅耐火材料的化学分析 第1部分：化学法》和EN 12698-2《氮化物结合碳化硅耐火材料的化学分析 第2部分：X射线衍射(XRD)法》。上述标准的分析方法比对见表20。

3.2.4 碳化硅晶片相关标准比对

有关碳化硅晶片产品标准，目前我国国家标准

表19 中国国家标准与ISO、日本、美国和韩国国家标准碳化硅磨料的化学分析方法对比

对比项目	GB/T 3045-2017 普通磨料 碳化硅化 学分析方法	ISO 9286-1997 磨料-碳化硅的 化学分析方法	JIS R 6124-1998碳 化硅磨料的化学分析 方法	ANSI B74.15-1992 碳化硅磨粒与磨料的 化学分析方法	KS L 6510-2003碳 化硅磨料的化学分析 方法
规定项目	GB的规定内容	ISO国际标准 的规定内容	JIS的规定内容	ANSI B的规定内容	KSL的规定内容
(1) 适用范围	化学分析方法和X 射线荧光分析方法的 规定	化学分析方法的 规定	化学分析方法和X射 线荧光分析方法的 规定	化学分析方法的规定	化学分析方法和X射 线荧光分析方法的 规定
(2) 化学分析项目及方法					
(2.1) 表面铁	—	原子吸收光谱法	原子吸收光谱法	—	原子吸收光谱法
(2.2) 表面氧化铝	分光光度法、原子 吸收光谱法	分光光度法、原 子吸收光谱法	吸光光度法、原子吸 收光谱法、EDTA 滴 定法、原子吸收光谱法	燃烧重量法、原子吸 收光谱法	分光光度法、EDTA 滴定法、原子吸收光 谱法
(2.3) 表面氧化钙	EDTA 容量法、原 子吸收光谱法	EDTA 容量法、原 子吸收光谱法	EDTA 滴定法、原子 吸收光谱法	燃烧重量法、原子吸 收光谱法	EDTA 滴定法、原子 吸收光谱法
(2.4) 表面氧化镁	EDTA 容量法、原 子吸收光谱法	EDTA 容量法、原 子吸收光谱法	EDTA 滴定法、原子 吸收光谱法	燃烧重量法、原子吸 收光谱法	EDTA 滴定法、原子 吸收光谱法
(2.5) 表面氧化铁	分光光度法、原子 吸收光谱法	—	—	燃烧重量法、原子吸 收光谱法、比色法	—
(2.6) 表面二氧化硅	分光光度法、氟硅 酸钾容量法	氟化钾/氢氟酸溶 液滴定	—	燃烧重量法、比色法	—
(2.7) 游离硅 (表面硅)	分光光度法、气体 容量法	气体容量法	吸光光度法、中和滴 定法、气体容量法	燃烧重量法、中和滴 定法、气体容量法	吸光光度法、中和滴 定法、气体容量法
(2.8) 游离碳 (表面碳)	燃烧吸收重量法、 红外吸收法、灼烧 减量法	燃烧重量法、 电量测定法	燃烧容量法(燃料重 量法)、全量测定 法、重量校正法	燃烧重量法	—
(2.9) 总碳	吸收重量法、红外 吸收法	燃烧重量法、 电量测定法	燃烧容量法、燃料重 量法、电量测定法	电阻炉技术、感应炉 技术	燃烧重量法、电量测 定法
(2.10) 游离碳	吸收重量法、红外 吸收法	燃烧重量法、 电量测定法	—	燃烧重量法、感应法	燃烧重量法、电量测 定法、重量校正法
(2.11) 碳化硅	—	—	—	焦硫酸钾熔解法、 燃烧重量法	燃烧重量法
(2.12) 表面 硅酸	—	—	吸光光度法、中和滴 定法	—	吸光光度法、中和滴 定法
(2.13) 全硅	—	—	重量法	燃烧重量法	重量法
(3) X射线荧 光分析项目及 方法	射线荧光法(RFA) 可用于表面铁、三 氧化二铝、氧化钙 和氧化镁的测定	据Annex中描述, 可以用X射线荧 光进行分析	荧光X射线分析方法 用于铁、铝、钙和镁 的分析	荧光X射线分析方法 用于铁、铝、钙和镁 的分析	荧光X射线分析方法 用于铁、铝、钙和镁 的分析

备注：1.表中的“—”表示没有规定。

有GB/T 30656《碳化硅单晶抛光片》，碳化硅晶片检测方面的国家标准有：GB/T 32278《碳化硅单晶片平整度测试方法》、GB/T 30866《碳化硅单晶片直径测试方法》、GB/T 37254《高纯碳化硅微量元素的测定》、GB/T 30867《碳化硅晶片厚度和总厚度变化测试方法》、GB/T 30868《碳化硅晶片微管密度的测定》。行业标准有SJ/T 11499《碳化硅单

晶电学性能的测试方法》、SJ/T 11500《碳化硅单晶晶向的测试方法》、SJ/T 11501《碳化硅单晶晶型的测试方法》、SJ/T 11502《碳化硅单晶抛光片规范》、SJ/T 11503《碳化硅单晶抛光片表面粗糙度的测试方法》、SJ/T 11504《碳化硅单晶抛光片表面质量的测试方法》、SJ 20858《碳化硅单晶材料电学参数测试方法》。国外无相关标准。

表20 中国国家标准与ISO和欧盟标准EN碳化硅耐火材料的化学分析方法对比

规定项目	对比项目	GB/T 16555	ISO 21068-2	EN 12698-1
		GB的规定内容	ISO国际标准的规定内容	EN欧洲标准的规定内容
(1) 适用范围		化学分析方法的规定	化学分析方法的规定	化学分析方法的规定
(2) 化学分析项目及方法				
(2.1) 总碳量		燃烧气体容量法、燃烧吸收重量法、高频炉燃烧红外线吸收法	库伦法、重量法、电导测定法、红外吸收法、热导率测量法	根据prEN ISO 21068规定的程序
(2.2) 游离碳量		燃烧气体容量法、燃烧吸收重量法、燃烧红外线吸收法、间接法	直接法、间接法、湿式氧化法	热铬硫酸碘酸法
(2.3) 碳化硅量		间接法、直接法、高压溶样重量法、氢氟酸挥发重量法	间接法、直接法、氢氟酸分解法、燃烧法	间接法
(2.4) 总氮量、总氧量		高压溶样重量法、仪器法	—	热导率法、载气熔融法(CGF)、熔融分解法、凯氏定氮蒸馏法、微波消解法
(2.5) 氮化硅			—	—
(2.6) 游离硅量		气体容量法、光度法	气体容量法、析氢法、银置换法	析氢方法
(2.7) 游离铝量		气体容量法、铁盐置换EDTA容量法	—	气体容量法
(2.8) 氧化铁量、氧化铝量		EDTA容量法	—	—
(2.9) 氧化物量的测定			—	原子吸收法(AAS)、ICP法
(2.10) 游离二氧化硅		—	参比法	

有关缺陷测试方法,国内有一个行业标准和—个团体标准,即SJ 21493《碳化硅外延片表面缺陷测试方法》、T/IAWBS 002《碳化硅外延片表面缺陷测试方法》。国外标准有:IEC 63068-2《半导体器件 动力器件用碳化硅同质外延晶片缺陷的无损识别准则 第2部分:光学检查法识别缺陷的试验方法》;IEC 63068-3《半导体器件 动力器件用碳化硅同质外延晶片缺陷的无损识别准则 第3部分:使用光致发光缺陷的测试方法》。JEITA EDR-4712/200《SiC晶片晶体缺陷的无损检测方法 第2部分:利用光学检测技术检测SiC外延层缺陷的方法》;JEITA EDR-4712/300《SiC晶片晶体缺陷的无损检测方法 第3部分:利用光致发光法检查SiC外延层缺陷的方法》。

3.3 比对结论

从上述标准指标比对结果可以看出:(1)国外有关碳化硅标准,例如:GOST 26327、SR 5064和JISR 6111,都制定了碳化硅产品的理化性能标准,其指标要求比中国国家标准宽松。但在对外技术交流和贸易合作过程中,我们发现发达国家碳化硅

生产企业和应用企业标准指标远远优于其所在国家标准和我国国家标准^[7]。有些项目在我国国家标准和部分企业实际质量控制中未列入检测控制项目,如:振实密度、比表面积、清洁度、韧性、电导率等;(2)针对碳化硅粒度砂与微粉产品,发达国家根据其用途不用,按照对口专用、精密化、综合利用原则,分成了多种牌号专用产品,专用产品的企业标准指标要求也不同,使生产者和使用—者找到了最佳结合点,产品产生了最大效益;(3)从碳化硅磨料的化学分析方法标准比对和含碳化硅耐火材料化学分析方法标准比对结果看,我国国家标准的比对项目相较于美国、欧盟及日本等发达国家及地区而言较为完整,但也有个别项目没有涉及,例如:碳化硅磨料的碳化硅、表面硅酸以及全硅等;(4)从碳化硅晶片相关标准比对结果看,我国国家标准对碳化硅单晶抛光片以及晶片检测方面制定了相关标准,而美国、欧盟、日本等发达国家及地区没有涉及。针对碳化硅外延片表面缺陷的测试环境,我国国家标准相较于欧盟以及日本标准要求更高。

表21 中国国家标准与国际标准IEC和日本电子和信息技术工业协会 (JETIA) 标准碳化硅外延片表面缺陷测试方法对比

对比项目 规定项目	SJ 21493-2018	T/IAWBS 002-2017	IEC 63068-2-2019 IEC 63068-3-2020	JEITA EDR-4712/200-2017 JEITA EDR-4712/300-2018
(1) 适用范围	光学测试方法的规定	无损光学测量方法的规定	光学检测方法的规定	无损光学检测方法的规定
(2) 测试原理	采用光学放大原理, 根据不同类型表面缺陷的光学形貌特征, 对缺陷进行分类检测和数量统计并进行求和	利用扫描表面检查系统产生的激光束在待测碳化硅外延片表面进行整体扫描, 并收集和确定来自表面的散射光、反射光的信号强度和位置, 与预设的已知缺陷的散射光、反射光的信号比较, 得到碳化硅外延片表面的一系列不同直径尺寸和方向的缺陷总数和分别	由晶片表面缺陷的原始数字图像产生灰度图像 (或彩色图像)。将此图像转换为二进制图像 (阈值法)。测量缺陷的大小和形状, 并计算特定区域内缺陷的分布和数量	光致发光法
(3) 测试设备	①人工测试设备 ②自动测试设备	—	光学系统	PL成像系统
(4) 测试环境	优于GB/T 25915.1-2010中规定的ISO 4级的洁净厂房洁净度要求	温度: 22℃ ± 2℃ 湿度: 45% ± 5% 洁净度100级或以上	—	—

4 对策建议分析

4.1 国内碳化硅产品标准优势

通过调研发现, 中国电科 (山西) 碳化硅材料产业基地作为全国最大的碳化硅材料供应基地, 其产品主要面向国内市场。目前国内碳化硅材料供应基地全面掌握了高纯碳化硅粉料制备工艺、4英寸高纯半绝缘碳化硅单晶衬底的制备工艺, 形成了从碳化硅粉料制备、晶体生长、晶片加工、外延验证等整套碳化硅材料研制线, 在国内最早实现了高纯度碳化硅单晶的商业化量产, 高纯碳化硅粉料纯度和晶体良品率居于国际先进水平, 彻底解决了国外对我国碳化硅封锁的局面, 实现了完全自主供应。此外, 中国电科 (山西) 碳化硅材料产业基地目前虽无已批准的标准, 但在2021年6月公司申请3项标准, 企业标准补充了国标及行业标准在某些方面的缺失, 在测试方法及参数要求方面严于国标及行标。

4.2 国内碳化硅产品标准不足

目前我国已成为碳化硅的生产大国, 但还不是碳化硅产业强国。从产品来看, 国内碳化硅产品主要集中在中低端市场, 真正用于高精尖科技, 比

如: 高级研磨粉、精密电子元件等方面的碳化硅产品生产工艺技术还被国外垄断; 在碳化硅深加工产品上, 对粒度砂和微粉产品的质量管理不够精细, 产品质量的稳定性不够, 国内产品技术含量低, 与美国、日本、欧洲等发达国家及地区先进水平相比还有较大差距, 国内高端技术产品缺乏; 此外, 西方发达国家从事该产品研发生产时间早经验丰富, 产品指标领先我国, 且产品验证周期长、产品技术壁垒难以打破, 国内产品难以进入国际市场; 最后, 碳化硅属于发展中产品, 有较大的市场需求, 但其工艺不成熟, 标准也处于低发展状态, 例如: 没有统一的包装标准, 检验标准不完善等。

4.3 提升我国碳化硅产业发展的对策建议

针对我国碳化硅产品发展存在的不足, 提出了下述建议和对策。

(1) 制定培育和扶持碳化硅产品的政策和实施细则

建议从顶层设计的角度, 建立系统的碳化硅产品培育政策和实施细则, 扶持有关企业的研发和生产, 从政府层面给予扶持和奖励。积极帮助企业寻求出口市场, 并以加大国内销售带动产品出口。在碳化硅方面, 作为第三代半导体的新型材料, 希

望政府能予以资金扶持推进研发,牵引推动应用端国内龙头企业与碳化硅产品生产商进行联合攻关试验,对比碳化硅进口产品使用效果,对国内产品提出持续改进意见,加快国产化替代步伐。

(2) 修订完善碳化硅产品的质量标准体系

通过标准比对发现,目前国内碳化硅产品的质量标准体系不够完善。碳化硅作为《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中集成电路领域的重点产品,可以结合当前碳化硅技术发展和未来趋势合理进行标准的制修订,例如:碳化硅产品的包装和运输标准

等。此外,中国电科(山西)碳化硅材料产业基地作为全国最大的碳化硅材料供应基地,企业标准和地方标准较为缺乏,建议先从制定团体标准和地方标准开始,逐步建立并规范现有的产品标准体系。

(3) 借助科技力量,加强技术创新

建议科研院所和企业一起协作,广泛收集国内外碳化硅产品的政策、法规,生产和市场等相关信息。例如:可围绕“安全”和“智慧”两大热点,聚焦电子装备智能制造、三代半导体、光伏新能源、网络信息安全和综合治理安全等领域,通过技术创新驱动与应用示范项目推广,助力经济转型。

参考文献

- [1] 搜狐. 碳化硅成十四五规划重点,未来可期! [EB/OL]. (2021-03-18) [2022-02-20]. https://www.sohu.com/a/456153161_296845.
- [2] 全国磨料磨具标准化技术委员会. GB/T 2480-2008, 普通磨料 碳化硅[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [3] 姜洪舟, 黄迪宇, 田道宇, 等. 无机非金属材料热工设备(第3版)[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2012.
- [4] 观研报告网. 中国碳化硅市场运营格局及投资战略分析报告(2012-2016)[R]. (2013-12-20) [2021-12-23]. www.chinabaogao.com/search?cid=report&word=中国碳化硅市场运营格局及投资战略分析报告%282012-2016.
- [5] 前瞻产业研究院. 2023-2028年中国碳化硅(SiC)行业发展前景预测及投资战略规划分析报告[R]. (2023-08-05) [2023-09-14]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/a1df7d6974464646.html>.
- [6] 前瞻产业研究院. 石英股份公司公告[R]. (2021-06-22) [2023-09-14]. <http://bg.qianzhan.com/report/detail/300/210622-588fe7a2.html>.
- [7] 秦敏. 我国碳化硅行业国家标准与国外标准的差异[EB/OL]. (2015-02-21) [2022-02-01]. http://www.jm-sic.com/article/wgthgxygjbzygwbzdcy_1.html.