

# 国家标准《碳化硅晶体材料缺陷图谱》

## 编制说明（送审稿）

### 一、工作简况

#### 1 标准编制的目的与意义

相较于硅，碳化硅具有宽禁带、高击穿电场、高热导率、高电子饱和漂移速率和高抗辐射等性能优点，非常适合大功率、高温、高频、抗辐射等应用场合。近几年，碳化硅基功率器件在各个行业的应用占比逐渐提高，后续降低成本和提高产品良率将是碳化硅产业的主要发展方向。而影响碳化硅产品良率和成本的主要因素就是生长、加工过程中引入的缺陷，例如，单晶生长时产生的晶锭缺陷、衬底切磨抛时产生的衬底缺陷、外延生长时产生的外延缺陷和器件制造时产生的工艺缺陷等。这些缺陷的存在降低了后续器件对碳化硅材料的利用率。

通过降低碳化硅晶体材料中的缺陷密度来提高材料的利用率，可以进一步降低碳化硅功率器件的制造成本，因此，有必要对碳化硅晶体材料在生产、加工中的缺陷进行识别、检验，而按其产生原因和影响程度对 SiC 晶体、衬底和外延层缺陷进行归类，对分析其产生原因和消除方法，具有重要意义。

目前尚未有碳化硅晶体材料缺陷图谱相关的标准，制定本标准可规范碳化硅晶体材料缺陷的定义，根据其特征规定典型的图谱，有利于分析缺陷的产生原因以及消除方法，可以指导碳化硅晶体材料的生产 and 研究，也可以给碳化硅器件的生产 and 研究作为参考。

#### 2 任务来源

项目由广东天域半导体股份有限公司提出，经国家标准化管理委员会批准立项，列入 2021 年第二批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划，计划编号为 20213238-T-469，项目周期为 24 个月。项目由广东天域半导体股份有限公司牵头起草，归口于全国半导体设备和材料标准化技术委员会材料分会技术委员会管理。

### 3 主要工作过程

#### 1) 立项阶段

2020 年广东天域半导体股份有限公司联合北京大学东莞光电研究院、河北同光半导体股份有限公司、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟(CASA)共同起草了《碳化硅晶体缺陷图谱》的草案稿和推荐性国家标准立项建议书，并于同年 10 月提交标委会秘书处。

2020 年 11 月在如皋举行的全国半导体设备和材料标准化技术委员会材料分会技术委员会年会上，技术委员会委员和来自中电四十六所、芜湖启迪等 14 家单位的专家对建议稿进行了论证，提出将标准名称《碳化硅晶体缺陷图谱》改为《碳化硅晶体材料缺陷图谱》，会后起草单位采纳了专家的意见，对建议稿进行了修改。

2021 年 3 月进行了线上立项答辩，评审专家提出两点意见：1、标准名称应与标准内容范围相一致，名称仅涉及图谱，但范围还涉及产生原因和消除方法；2、部分缺陷有对应的消除办法但部分没有，这一点需要保持一致。

会后起草单位借鉴同行业已发布的缺陷图谱标准的名称和范围，（GB/T 30453-2013《硅材料原生缺陷图谱》、GB/T 30453-2013《蓝

宝石晶体缺陷图谱》), 结合本标准特点和目前的技术水平综合考虑, 对评审专家提出的意见进行部分采纳, 具体为对标准的范围进行了修改, 删掉了缺陷的消除方法内容, 保留缺陷图谱和产生原因, 标准名称仍保持为《碳化硅晶体材料缺陷图谱》。

国家标准化管理委员会于 2021 年 8 月下达了标准计划。

## 2) 起草阶段

标准计划下达后, 广东天域立即组织成立正式的标准编制工作组, 第一批成员为广东天域、CASA、东莞光电研究院、河北同光和山东天岳先进科技股份有限公司。2021 年 9 月在芜湖会议上进行了标准编制任务落实, 会上召集了安徽长飞先进半导体有限公司、北京天科合达半导体股份有限公司和江苏卓远半导体有限公司加入工作组, 共同参与标准起草工作。

会后工作组根据专家的建议, 组织召开了第一次组内工作会, 制定了工作计划, 开展晶片试验和缺陷图谱的收集工作。2022 年 1 月完成了相关资料的收集与分析, 形成初稿。而后对初稿进行了内部意见征求, 北大光电研究院、安徽长飞等 6 家起草单位提出了“增加术语晶锭缺陷”“修改螺位错的形貌特征描述”“补充刃位错的产生原因”等 18 条修改意见, 工作组内部讨论后对意见进行了部分采纳。

在经过内部征求意见和多次组内讨论修改后, 于 2022 年 2 月形成了标准讨论稿。原定于 2022 年 3 月在东莞召开的标准讨论会议, 由于疫情影响现场会议受限, 未能举办。

2022 年 12 月编制工作组向上海瞻芯电子、绍兴中芯、香港创能

动力和中电化合物半导体等碳化硅同行企业发出标准讨论稿进行意见征询，得到了“将结晶缺陷改为晶格缺陷”“添加台阶聚集的形成原因”等 14 条修改意见。2023 年 1 月，根据回函情况，经过编制小组讨论研究，对意见进行了部分采纳，并对标准讨论稿再次进行了修改，形成《碳化硅晶体材料缺陷图谱》预审稿。

2023 年 2 月在徐州年会上，对标准进行了第一次现场会议讨论，来自中电科十三所、中科院半导体所、北大东莞光电研究院、天科合达、中电化合物和松山湖材料实验室等 28 家单位的专家，提出了“在范围中写明文件所指碳化硅的具体类型”“在晶锭缺陷中增加微管缺陷”“优化图谱质量”“增加更多相关企业加入编制工作组参编”等 20 条意见。

会后，工作组采纳了徐州年会上专家提出的部分建议，并作出相应的内容修改，包括：1、为了加强编制工作组的广泛性和代表性，进一步召集了碳化硅产业链上的代表性企业和机构加入工作组共同参与编制工作，包括：中电化合物半导体有限公司、浙江东尼电子股份有限公司、南京国盛电子有限公司、中国科学院半导体研究所和中国电子科技集团公司第十三研究所；2、针对优化图谱质量的意见，工作组根据标准的主要内容，分成了晶锭缺陷、衬底缺陷、外延缺陷和工艺缺陷四个工作小组，并确定了河北同光（晶锭缺陷）、山东天岳（衬底缺陷）、广东天域（外延缺陷）、安徽长飞（工艺缺陷）作为对应方向的统筹单位，分别在各自领域征集典型的高质量缺陷图谱，最后由广东天域和北大东莞光电院进行汇编，过程中共收集到代表企

业提供的图谱 167 张，经讨论后共筛选出 120 张图谱采纳到标准文件中；3、明确了本标准所收录的缺陷图谱限定在导电型 4H 碳化硅范围内；4、增加了晶锭和外延部分的微管缺陷等，形成了第二次预审稿；5、在编制说明上增加了图谱来源和各参与单位的工作情况。

### 3) 征求意见阶段

2023 年 3 月全国半导体设备和材料标准化技术委员会材料分技术委员会将《碳化硅晶体缺陷材料图谱》征求意见稿和编制说明，在“全国标准信息公共服务平台”上挂网，向社会公开征求意见。2023 年 4 月广东天域向除编制组单位以外的，宁波比亚迪半导体有限公司、昂坤视觉（北京）科技有限公司、杭州士兰集成电路有限公司、中国电子科技集团公司第四十八研究所、华润微电子研究院、西安电子科技大学等 51 家单位邮件发送标准征求意见稿，进行意见征求。征求意见的单位包括碳化硅晶体材料主要的生产、使用企业、检测设备厂商、科研院所和高校等，征求意见单位广泛且具有行业代表性。（具体征求意见单位名单见附件一）

截止 2023 年 5 月 15 日，有 17 家单位反馈了共计 66 条修改意见，30 家单位反馈无意见，4 家单位未反馈意见。根据征求意见的回函情况，编制组讨论研究后，提出了具体的修改意见及采纳情况（采纳 35 条、部分采纳 6 条、不采纳 25 条）。广东天域根据修改意见对标准文本进行了修改，形成了《碳化硅晶体缺陷材料图谱》标准送审稿。（具体意见采纳情况见附件二）

### 4) 专题研讨阶段

2023年5月26日，在东莞组织了关于本标准的专题讨论会。会议邀请了昂坤视觉（北京）科技有限公司、中国电子科技集团公司第四十八研究所和芯三代半导体科技苏州有限公司等连同编制组共20家行业内代表企业的专家参会。会议以线下为主，部分代表线上参会的形式举行。会上，专家们对标准文稿进行了逐字逐句的审度和讨论，并提出了将范围中“外延片和器件”修改为“外延片及后续工艺”、在衬底微管缺陷的产生原因中增加多型、更换晶锭缺陷中图1~图4图谱等43条意见。

会后，工作组采纳了专题会上专家提出的部分意见，并作出相应的内容修改，包括：1、对标准的文稿重新进行了梳理简化，减少口语化的描述；2、对于模糊或无代表性的图谱进行了替换或删除等。期间河北同光、山东天岳、东尼电子和天科合达提供了晶锭和衬底部分的图谱与词条描述，广东天域统稿并进行了全文修改，形成了标准送审稿。

#### **4 各参与单位工作情况**

河北同光、山东天岳、天科合达、东尼电子、中电化合物参与了晶锭缺陷部分的审定和编制，由河北同光统筹；山东天岳、河北同光、天科合达、东尼电子、中电化合物、半导体所参与了衬底缺陷部分的审定和编制，由山东天岳统筹；广东天域、南京国盛、中电科十三所参与了外延缺陷部分的审定和编制，由广东天域统筹；安徽长飞、江苏卓远参与了工艺缺陷部分的审定和编制，由安徽长飞统筹；广东天域、北大东莞光电院、CASA进行了任务协调、意见汇总、修订全文

和图谱溯源等工作。每家单位具体工作情况见下表。

单位名称	工作情况
广东天域	<p>1.草案稿阶段：搜集、汇总素材，确定文稿框架，主要编制立项草案稿；</p> <p>2.工作组讨论稿阶段：统筹撰写，补充外延缺陷部分词条 13 条；</p> <p>3.第一次预审稿阶段：修改词条描述 25 条，补充更新外延缺陷部分图谱 44 张；</p> <p>4.第二次预审稿阶段：组织各单位协同分工，且作为外延部分的统筹单位，修改词条描述 15 条，补充更新图谱 67 张。</p> <p>5.征求意见稿阶段：向相关 51 家相关单位发送文稿征求意见，收集汇总意见 66 条，根据意见对标准文稿进行修改。</p> <p>6.专题研讨阶段：组织举办专题会议，会后收集各单位修改部分，统稿并对文稿全文进行修改，更新图谱 2 张。</p>
北大东莞光电	<p>1.草案稿阶段：协助编制立项草案稿，提供标准文稿撰写规范建议；</p> <p>2.工作组讨论稿阶段：协助划定标准范围、规范标准撰写格式，提出修改意见 9 点；</p> <p>3.第一次预审稿阶段：提出修改意见 14 点；</p> <p>4.第二次预审稿阶段：协助广东天域进行图谱溯源、汇总、分类，提出修改意见 30 点。</p> <p>5.征求意见稿阶段：协助广东天域整理反馈意见，对标准征求意见稿格式进行了修改。</p> <p>6.专题研讨阶段：参与研讨会并提出修改意见 6 点。</p>
山东天岳	<p>1.工作组讨论稿阶段：补充外延缺陷部分词条 4 条，</p>

	<p>提出修改意见 9 点；</p> <p>2.第二次预审稿阶段：作为衬底部分的统筹单位，组织小组工作，增加、修改词条 15 条，提供缺陷图谱 38 张。</p> <p>3.征求意见稿阶段：汇总衬底图谱的测试设备与方法等信息。</p> <p>4.专题研讨阶段：参与研讨会并提出修改意见 5 点；修改词条 4 条，更新图谱 1 张。</p>
河北同光	<p>1.草案稿阶段：提供晶锭部分缺陷图谱 10 张，撰写缺陷词条 8 条；</p> <p>2.工作组讨论稿阶段：补充外延缺陷部分词条 6 条，提出修改意见 2 点；</p> <p>3.第二次预审稿阶段：作为晶锭部分的统筹单位，组织小组工作，增加、修改词条 2 条，提供缺陷图谱 7 张。</p> <p>4.专题研讨阶段：参与研讨会并提出修改意见 1 点；修改词条 4 条，提供图谱 4 张。</p>
CASA	<p>1.草案稿阶段：作为 T/CASAS 004.2—2018《4H 碳化硅衬底及外延层缺陷图谱》的权属单位，提供了图谱相关素材。</p> <p>2.第二次预审稿阶段：审核标准文稿，提出修改意见 2 点。</p> <p>3.专题研讨阶段：参与研讨会讨论。</p>
中电化合物	<p>1.第一次预审稿阶段：提出修改意见 6 点；</p> <p>2.第二次预审稿阶段：提出修改意见 3 点，提供晶锭、衬底缺陷图谱 38 张。</p> <p>3.专题研讨阶段：参与研讨会讨论。</p>
东尼电子	<p>1.第二次预审稿阶段：提供衬底缺陷图谱 14 张。</p> <p>2.专题研讨阶段：参与研讨会讨论，提供图谱 3 张。</p>



安徽长飞	1.工作组讨论稿阶段：补充外延缺陷部分词条 5 条； 2.第二次预审稿阶段：作为工艺部分的统筹单位，组织小组工作，提供图谱 2 张。 3.专题研讨阶段：参与研讨会并提出修改意见 2 点。
南京国盛	1.第二次预审稿阶段：审核外延部分文稿。 2.专题研讨阶段：参与研讨会并提出修改意见 2 点。
江苏卓远	1.工作组讨论稿阶段：补充外延缺陷部分词条 2 条； 2.第二次预审稿阶段：审核工艺部分文稿。 3.专题研讨阶段：参与研讨会并提出修改意见 5 点。
天科合达	1.第二次预审稿阶段：提出修改意见 3 条，提供晶锭、衬底缺陷图谱 1 张。 2.专题研讨阶段：参与研讨会讨论，提供图谱 3 张。
半导体所	1.第二次预审稿阶段：审核晶锭、衬底部分文稿。 2.专题研讨阶段：参与研讨会并提出修改意见 1 点。
中电科十三所	1.第二次预审稿阶段：审核外延部分文稿。 2.专题研讨阶段：参与研讨会讨论。

## 二、标准编制原则和标准主要内容及其确定的依据

### 1 标准编制原则

标准文件格式按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求和规定编写。

### 2 标准的主要内容

本标准主要给出了导电型 4H 碳化硅材料在晶锭、衬底、外延和工艺制造四个生产环节中，产业链上下游企业和科研院所重点关注的主要缺陷的形貌特征、产生原因及其对应的典型图谱。本标准共收录缺陷 41 种，图谱 168 张，根据产业环节将缺陷分为四个大部分，如

下：

晶锭缺陷（5种缺陷、8张图谱）：裂纹、杂晶、边缘多晶、多型、微管；

衬底缺陷（17种缺陷、42张图谱）：多晶、多型、硅滴包裹体、碳包裹体、六方空洞、层错、螺位错、刃位错、基平面位错、小角晶界、微管、凹坑、崩边、缺口、裂纹、划痕、沾污；

外延缺陷（15种缺陷、108张图谱）：掉落颗粒物、三角形缺陷、彗星缺陷、胡萝卜缺陷、小坑缺陷、梯形缺陷、台阶聚集、外延凸起、乳凸、微管、层错、螺位错、刃位错、基平面位错、半环列阵；

工艺缺陷（4种缺陷、10张图谱）：氧化缺陷、电应力诱导三角形层错、电应力诱导条形层错、干法刻蚀缺陷。

### 3 标准内容的确定依据

1) 编制组成员具有代表性：标准编制组成员作为行业代表企业，能够凭借深厚的经验对标准文本进行编制和初步把关。

2) 图谱来源广泛切实：本标准的图谱和产生原因是由行业代表企业在实际生产和科研活动中收集、分析、总结而来的，且在获取图谱时采用的检测和观察方法是行业上下游常用且公认的，包括：微分干涉法、激光散射法、光致发光法和光学显微法等，尽可能多的展示一种缺陷在不同检测设备和方法下的多种形貌图谱，能够代表现有技术水平所能观测到的缺陷的典型形貌。

3) 行业内普遍认可：在征求意见阶段，除公开挂网外，编制单位还向行业内相关的生产企业和高校科研院所邮件发送了标准文件征求

各单位的意见，并根据收到的意见对标准进行了完善修改。而后又邀请了 20 家行业内代表单位参与专题讨论会，专项研讨本标准。**4 缺陷和图谱的排序规则**

缺陷排序原则：本标准将导电型4H碳化硅材料的缺陷按照产业链环节顺序排为晶锭、衬底、外延和工艺四类，同一环节中的缺陷，某些缺陷是另一种或另几种缺陷的产生原因，为了方便使用者理解，尽可能将会导致其他缺陷产生的缺陷排在前面。

图谱排序原则：按第四章缺陷词条中文本描述的顺序进行排列。

## **5 测得图谱的方式**

本标准测得图谱使用的都是行业内普遍使用的设备和方法，主要的使用的仪器设备有光学显微镜（MX63）、光学显微镜（L200N）、光学显微镜（FabXLab-LFM SIC）、平板扫描仪（M128fn）、影像测量仪（VMS-5040HT）、X 射线形貌测试系统（XRTmicron）、同步辐射测试系统（Advanced photon source）、扫描电子显微镜（S4800）、原子力显微镜（NX20）、表面缺陷检测分析仪（SICA88）、表面缺陷检测分析仪（Candela 8520）。（具体测得图谱使用的设备、方法见附件三。）

## **6 图谱图题中括号内的注释**

由于晶锭、衬底、外延和工艺每一环节，行业认可的缺陷测试表征手段都不相同，所以无法统一注释测试方法或图像类型。故本标准文件中图题中括号内的注释为行业内普遍采用的表征方式。

## **三、预期达到的社会效益**

电力电子器件（或称功率半导体器件、功率器件）是电力电子技术发展的基础和核心。经过多年的发展，传统硅基功率器件的性能已逼近理论极限，碳化硅基器件相较于硅有着高热导率、高抗辐射等性能优势，适用于大功率、高频等应用场景，同时碳化硅基器件还具有体积小、散热效率高、运行损耗低、制备污染少等经济和环保效益。近几年我国在多个发展指南文件中多次重点提及要大力支持碳化硅材料的发展，目前国内碳化硅领域也逐步形成了从设备、材料到器件的完整产业链。随着近两年新能源汽车的兴起，吸引了一批企业投资入行碳化硅行业，但作为近几年才发展起来的新产业，碳化硅产业链上下游在标准约束和执行上还是存在着大片空白。

碳化硅晶体材料在生长、加工等环节都会产生缺陷，这些缺陷与其他半导体材料（如硅、锗）的缺陷，在形状、类型、起因上有部分不同或完全不同，这些缺陷的存在会降低后续器件生产中碳化硅材料的利用率。本标准对碳化硅晶体材料从晶锭到器件的各个工艺环节中可能产生的缺陷的形貌特征和产生原因进行了描述，并标识了对应的缺陷图谱以供查阅。标准内容充分考虑实际生产情况，同时结参考同行业及相关行业的相关标准，使标准具有充分的先进性和广泛适用性。

碳化硅产业在一些高压材料、器件制备工艺上还存在被国外厂商卡脖子的情况，国内相关研究机构和企业也在积极开展碳化硅的基础研究、应用研究和产业化研究，以期尽早摆脱困境，本标准的实施，可以为这些研究提供理论基础，缩短研究时间，可以帮助推动我国碳化硅产业的更快速、更高质发展，早日实现产业链的全面国产化。

#### 四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

#### 五、采用国际标准和国外先进标准的情况

本标准不涉及国际标准和国外先进标准采标情况。

#### 六、与有关现行法律、法规和强制性标准的关系

本标准与有关现行法律、法规和强制性标准相协调，无冲突。

#### 七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准制定过程中无重大分歧意见。

#### 八、标准性质的建议

建议作为推荐性标准发布实施。

#### 九、贯彻标准的要求和建议措施

本标准发布后，建议由归口单位、主编单位组织标准宣贯会，对标准文本进行解读。建议发布时彩色打印。

#### 十、废止现行有关标准的建议

无。