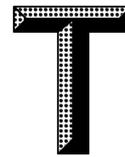


ICS 31.080
CCS L 43



团 体 标 准

T/CI 544—2024

低维半导体材料生长、表征及电子元器件 制作流程规范

Process specification for growth, characterization, and electronic device
fabrication of low-dimensional semiconductor materials

2024-10-08 发布

2024-10-08 实施

中国国际科技促进会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
4.1 基本原则	2
4.2 生长要求	2
4.3 表征技术	3
5 电子元器件制作流程	5
5.1 概述	5
5.2 材料准备	5
5.3 清洗	5
5.4 图案化	5
5.5 掺杂	5
5.6 沉积	6
5.7 蚀刻	6
5.8 热处理	6
5.9 元器件组装	6
6 检验与测试	6
6.1 检查要求	6
6.2 检查项目及方法	6
参考文献	8

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国国际科技促进会提出并归口。

本文件主要起草单位：济南大学、北京理工大学、西安交通大学、江南大学、中国科学院半导体研究所、哈尔滨工业大学、哈尔滨工业大学(深圳)、厦门大学、贵州师范大学、陕西师范大学、苏州基元科技有限公司、中国有研科技集团有限公司、哈尔滨工业大学重庆研究院、苏州科技大学、上海交通大学、青岛亦有道农业科技有限公司，北京高科中创科学技术中心。

本文件主要起草人：刘宏、周伟家、逢金波、王业亮、杨国锋、朱京平、牛智川、高娜、秦敬凯、刘雪飞、高健智、王迪、许向鹏、张墅野、毕津顺、赵鸿滨、刘瑞、李春生、杨睿、逢军、王德周。

低维半导体材料生长、表征及电子元器件 制作流程规范

1 范围

本文件规定了低维半导体材料生长、表征及电子元器件制作的总则、电子元器件制作流程、检验与测试。

本文件适用于低维半导体材料生长、表征及电子元器件制作流程。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1555 半导体单晶晶向测定方法

GB/T 2423.4 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 Db：交变湿热（12 h+12 h 循环）

GB/T 13971 紫外线气体分析器技术条件

GB/T 35392 无损检测 电导率电磁（涡流）测定方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

纳米银材料 silver nanomaterials

三维空间尺度至少有一维处于纳米量级（1 nm~100 nm）的单质银材料，其可以粉末形式或分散在溶液中存在。

[来源：GB/T 36083—2018, 3.1]

3.2

低维半导体材料 low-dimensional semiconductor materials

在至少一个空间维度上尺寸小于费米波长的半导体材料。

注：包括量子点、量子线、量子阱等。

3.3

半导体材料生长 semiconductor material growth

利用化学或物理方法在衬底上制备半导体材料的过程，旨在精确控制其晶体结构和性能。

3.4

表征技术 characterization techniques

用于测量和分析半导体材料或器件的物理、化学、结构和电学性质的一系列方法和手段，以评估和优化材料或器件的性能。

3.5

电子元器件制作 **electronic device fabrication**

将半导体材料经过一系列加工步骤转化为具有特定电子功能的器件的过程。

4 总则

4.1 基本原则

基本原则如下。

- a) 质量优先原则。所有生长、表征及制作步骤宜符合本文件,通过精确控制工艺参数,提高材料和元器件的性能。
- b) 安全性原则。在所有操作中优先考虑安全,采取必要措施防止化学品泄漏、设备故障和操作失误导致的安全事故。
- c) 环保原则。在生长、表征和制作过程中采用环保材料和方法,减少废物和有害物质的排放,保护环境。
- d) 可重复性原则。确保流程可被准确重复执行,以便生产出一致性高的材料和元器件,保障批量生产的稳定性和可靠性。
- e) 创新原则。宜采用最新的科学研究成果和技术创新来优化低维半导体材料生长、表征及电子元器件制作流程,提高材料和元器件的性能和应用范围。

4.2 生长要求

4.2.1 纯度与组成

4.2.1.1 应确保生长的半导体材料达到预定的纯度。应采用高纯度的前驱体材料(纯度 $\geq 99.999\%$),并严格限制杂质的引入。

4.2.1.2 宜通过高精度的质谱或 X 射线光电子能谱定期检验材料的成分和纯度,提高生长过程的一致性和产品的可靠性。

4.2.2 晶体结构

4.2.2.1 应采用适当的生长技术(例如分子束外延、化学气相沉积、金属预制层硒化或硫化等)材料的晶体结构,晶体的指向性和晶格参数应符合预定规范。

4.2.2.2 宜定期使用 X 射线衍射来监控晶体结构的一致性和完整性。

4.2.3 表面形貌

4.2.3.1 应通过控制适当的生长参数,优化材料的表面形貌,包括平整度和粗糙度。使用原子力显微镜或扫描电子显微镜进行表面质量评估。

4.2.3.2 材料表面应无大量裂纹或缺陷,利于后续的器件制作和表征工作。

4.2.4 厚度控制

4.2.4.1 精确控制低维材料的厚度(例如 1 nm~20 nm)和层数,尤其是对于量子点、量子线、量子阱、二维材料等纳米结构。厚度的控制误差应保持在允许的范围内($\pm 3\%$)。

4.2.4.2 宜采用 X 射线衍射、原子力显微镜、光谱反射率测重或椭圆偏振法等方法定期检测材料的厚度,提升生产过程的稳定性和重复性。

4.2.5 生长环境

4.2.5.1 材料生长应在受控的环境条件下进行,包括但不限于温度、压力和气氛。这些参数应根据具体的生长技术严格控制,以优化材料的结构和性能。

4.2.5.2 宜定期监测和校准生长设备,生长环境的稳定性和生长过程的可重复性,周期宜为半年/次。

4.2.6 能耗与效率

4.2.6.1 应采取措施优化生长过程的能耗,通过提高材料生长的效率和产率,减少能源消耗和生产成本。

4.2.6.2 宜评估和实施节能技术,如低温生长技术或高效能源利用系统,促进可持续生产。

4.2.7 环境与安全

4.2.7.1 材料的生长应在符合环保和安全规范的前提下进行。采用无害或低害的化学试剂,并采取必要的安全措施,如适当的排风和废物处理系统。

4.2.7.2 宜定期进行环境影响评估和安全风险评估,周期宜为半年 1 次。

4.3 表征技术

4.3.1 概述

表征技术包括结构表征、化学成分表征、光学性质表征、电学性质表征、机械性能表征,表征技术示意图,如图 1 所示。

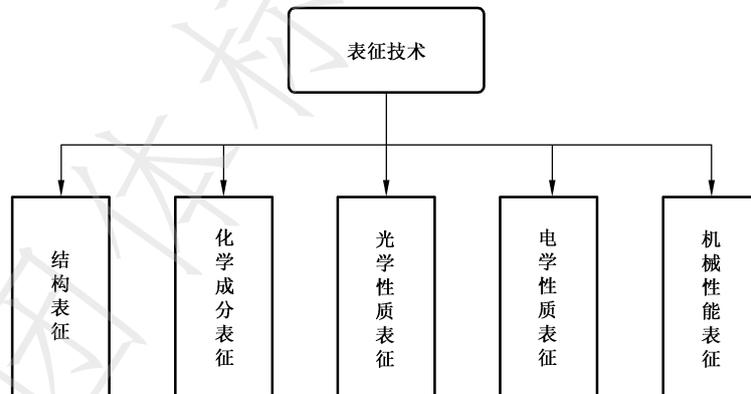


图 1 表征技术示意图

4.3.2 结构表征

4.3.2.1 晶体结构分析

4.3.2.1.1 应使用 X 射线衍射检测材料的晶体相和晶格常数。每批材料至少应从 3 个不同样品中取样进行测试,提高结果的代表性和重复性。半导体单晶晶向检测方法应符合 GB/T 1555 的要求。

4.3.2.1.2 宜进行高分辨透射电子显微镜分析,提高晶体的缺陷密度和晶界特性。分析报告中应包括晶体缺陷的统计数据 and 相应的晶界图像。

4.3.2.2 晶体取向和晶畴结构分析

应采用透射电子显微镜和选区电子衍射技术,确定材料的晶体取向和晶畴大小。每个样品至少应

进行 3 次独立测量以评估晶畴的均匀性。

4.3.2.3 设备和程序

宜确保所有衍射设备和电子显微镜均按照国际标准进行校准,并使用国家或国际认可的标准样品进行年度校验。

4.3.3 化学成分表征

4.3.3.1 元素组成定量分析

应使用能量色散 X 射线光谱和 X 射线光电子能谱定量分析样品的元素组成。每种元素的含量应在误差范围 $\pm 1\%$ 内。

4.3.3.2 化学状态分析

应利用 X 射线光电子能谱深入分析材料中各元素的化学状态及其化学环境,特别是掺杂元素和表面处理后的化学变化。

4.3.3.3 样品前处理与分析环境

宜在超高真空环境中进行所有 X 射线光电子能谱测试,以避免样品表面污染。所有样品宜在测试前 24 小时内完成清洗和干燥处理。

4.3.4 光学成分表征

4.3.4.1 光吸收与发射特性

4.3.4.1.1 应使用紫外/可见吸收光谱评估材料的光吸收性能。

4.3.4.1.2 每个样品应从一定面积范围内(例如 $\geq 100 \mu\text{m}^2$),取 3 个不同区域测量吸收峰,评估样品的光学均匀性。

4.3.4.1.3 紫外线气体的检测方法应符合 GB/T 13971 的要求。

4.3.4.1.4 宜进行光致发光光谱分析,记录从紫外到红外范围的发射特性,确定材料的带隙宽度和缺陷状态。

4.3.4.2 光谱分辨率和有效性

所有光学测量应使用分辨率高于 1 nm 的光谱仪进行,并应定期校准,保持有效性。

4.3.5 电学性质表征

4.3.5.1 电导率和迁移率测定

应通过四探针测试方法测定材料的电导率。对每批材料至少选择 3 个样品进行测试,提升数据的代表性和一致性。电导率测试应符合 GB/T 35392 的要求。

4.3.5.2 温度依赖性电性测试

可在不同温度下(如 300 K~350 K)测试材料的电学性质,评估其潜在的热稳定性和适用性。环境试验应符合 GB/T 2423.4 的要求。

4.3.6 机械性能表征

4.3.6.1 硬度与模量

4.3.6.1.1 应使用纳米压痕技术测定材料的硬度和弹性模量。每个样品至少进行 5 次独立测试,提高结果可靠性。

4.3.6.1.2 宜评估材料在不同载荷下的变形行为,理解其机械响应和潜在的断裂机制。

4.3.6.2 疲劳行为测试

可通过循环加载测试评估材料的疲劳行为。测试应包括 4 次~10 次加载循环,记录材料的应力-应变响应。

5 电子元器件制作流程

5.1 概述

电子元器件制作流程如图 2 所示。

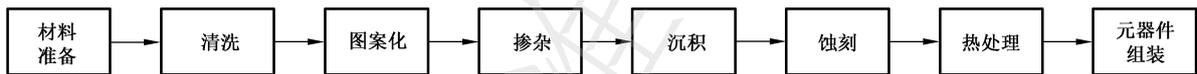


图 2 电子元器件制作流程示意图

5.2 材料准备

5.2.1 依据电子器件的功能和性能要求,选用如硅、砷化镓、氮化镓等不同的半导体材料。对于特定的光电应用,可选择具有特定光学特性的材料如量子点或二硒化钨等二维材料。

5.2.2 基底材料需具有良好的热稳定性和化学惰性,常见材料包括单晶硅、石英、蓝宝石等。

5.2.3 根据器件设计,精确裁剪材料和基底到所需尺寸,并与后续工艺步骤有兼容性。

5.3 清洗

5.3.1 使用有机溶剂如丙酮、异丙醇等去除油脂和有机污染物。

5.3.2 使用酸性或碱性溶液去除表面的金属离子和其他无机残留物。

5.3.3 使用超声波、等离子体清洗去除顽固的污染物。

5.4 图案化

5.4.1 使用紫外光(例如波长为 h 线 405 nm)照射到覆盖有光刻胶的基底上,使用掩模定义出微纳结构(光刻特征尺寸 $\geq 1 \mu\text{m}$)的图案。

5.4.2 对于更精细的图案(光刻特征尺寸 $< 1 \mu\text{m}$),使用电子束曝光技术,在光刻胶或抗蚀剂层上定义所需的纳米级图案。

5.5 掺杂

5.5.1 通过高能离子束将杂质原子如磷、硼注入到半导体材料中。

5.5.2 将半导体材料置于含有杂质源的高温炉中,使杂质原子通过高温扩散进入材料内部。

5.6 沉积

5.6.1 利用物理方法(如溅射或蒸发)在基底上沉积材料前驱体层。

5.6.2 通过化学反应在基底表面生成均匀的薄膜。

5.7 蚀刻

5.7.1 使用等离子体等干法蚀刻技术,通过高能粒子轰击未被光刻胶覆盖的区域,选择性去除低维半导体材料。

5.7.2 使用特定化学溶液对低维半导体材料进行选择性的蚀刻。

5.8 热处理

5.8.1 通过控制加热和冷却过程,减少晶格缺陷,优化结晶质量。

5.8.2 面向大规模生产高性能电子器件,可采用快速加热和冷却技术,提高低维半导体材料载流子迁移率等电学性质。

5.9 元器件组装

5.9.1 使用绑线机等微焊接技术将半导体芯片与电极和封装结构连接起来,提升电气连接的可靠性。

5.9.2 对完成的芯片进行封装,保护器件免受环境影响,延长使用寿命。

6 检验与测试

6.1 检查要求

6.1.1 在受控的环境条件下进行材料生长,包括但不限于温度、压力和气氛。

6.1.2 优化生长过程的能耗,通过提高材料生长的效率和产率减少能源消耗和生产成本。

6.1.3 在符合环保和安全规范的前提下进行材料的生长,使用无害或低害的化学试剂,并采取必要的安全防护和环境保护措施。

6.2 检查项目及方法

检查项目及方法见表1。

表1 检查项目及方法

检查项目	检查方法
材料准备	对所使用的半导体材料进行全面的入库检验,包括材料的尺寸、类型、和纯度确认。使用光谱分析和显微结构检测,确认材料符合生产规格
清洗	采用有机溶剂等方法进行表面清洗后,可采用表面张力测试仪、紫外/可见光谱分析检测表面残留物,评估清洗情况
图案化	在图案化过程中使用显微镜检查微纳结构的尺寸、边界清晰度及均匀性。比较设计图与实际图案的对比度和尺寸,确认图案精确制作
掺杂	通过次级离子质谱对掺杂区域进行深度分析和分布均匀性评估。确认掺杂深度和浓度符合设计要求

表 1 检查项目及方法 (续)

检查项目	检查方法
沉积	在沉积过程中,使用原子力显微镜或扫描电子显微镜检测沉积薄膜的厚度和均匀性。每一层沉积材料都达到预期的均匀性和厚度规范
蚀刻	使用表面分析技术,如扫描电子显微镜检查蚀刻后的材料表面。蚀刻深度和图案符合设计参数,没有不必要的残留物或损伤
热处理	使用热成像摄像机和数字温度计监测热处理过程中的温度分布和稳定性。设置温度循环,每个热处理步骤能达到所需的温度和时间规范
元器件组装	在组装过程中,使用光学显微镜和 X 射线成像检查半导体芯片与电极和封装结构的对齐和连接质量。所有连接点无虚焊、冷焊,且机械和电气连接均稳固

参 考 文 献

- [1] GB/T 36083—2018 纳米技术 纳米银材料 生物学效应相关的理化性质表征指南
-

中国国际科技促进会
团体标准
低维半导体材料生长、表征及电子元器件
制作流程规范
T/CI 544—2024

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)

网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 15 千字
2025年1月第1版 2025年1月第1次印刷

*

书号: 155066·5-9493 定价 38.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



T/CI 544-2024