

引用格式: 何志峰, 王凯旋, 徐祝青, 等. 柔性半导体器件标准体系构建研究与探讨[J]. 标准化学报, 2026(9): 138–148.
HE Zhifeng, WANG Kaixuan, XU Zhuqing, et al. Research and Discussion on the Construction of Standards System for Flexible Semiconductor Devices[J]. Journal of Standardization, 2026(9): 138–148.

柔性半导体器件标准体系构建研究与探讨

何志峰^{1,2} 王凯旋¹ 徐祝青¹ 朱明敏¹ 朱海斌^{2,6} 杨晓锋³ 周浩森^{1*} 马少鹏⁴ 汤知源⁵

(1. 中国计量大学; 2. 浙江清华柔性电子技术研究院; 3. 工业和信息化部电子第五研究所; 4. 上海交通大学;
5. 浙江省质量科学研究院; 6. 浙江迈沐智能科技有限公司)

摘要:【目的】柔性半导体器件凭借其轻、薄、柔等特性,能够便捷地与生物或装备进行集成,但相关技术标准缺失制约了其在各领域的深度拓展与规模化应用,亟须建立健全柔性半导体器件标准体系。【方法】通过梳理柔性半导体器件的国内外标准化现状,系统分析了柔性半导体器件产业技术演进对标准体系的挑战,归纳并构建了包括基础通用标准、设计标准、工艺标准、产品标准、测试与评价标准、应用标准共6个子体系类别的柔性半导体器件标准体系框架。【结果】当前标准体系呈现测试标准集中、整体覆盖不足等特征,需通过构建快速响应与前瞻布局并行的标准研制范式、强化标准的顶层设计与协同、深化基础研究和复杂验证能力建设、实施“技术—标准—市场”联动战略等路径促进标准体系建设。【结论】建立科学、合理、全面的柔性半导体器件标准体系,为政策制定者、行业监管机构、技术研究者和产业界提供参考,有助于推动柔性半导体技术高质量稳定发展。

关键词: 柔性电子; 半导体器件; 标准化; 标准体系

DOI编码: 10.3969/j.issn.2097-857X.2026.09.014

Research and Discussion on the Construction of Standards System for Flexible Semiconductor Devices

HE Zhifeng^{1,2} WANG Kaixuan¹ XU Zhuqing¹ ZHU Mingmin¹ ZHU Haibin^{2,6}
YANG Xiaofeng³ ZHOU Haomiao^{1*} MA Shaopeng⁴ TANG Zhiyuan⁵

(1. China Jiliang University; 2. Institute of Flexible Electronics Technology of THU;

基金项目: 本文受国家重点研发计划项目“柔性电子多物理量监测系统可靠性测试分析技术”(项目编号: 2023YFF0616800)资助。

作者简介: 何志峰, 博士研究生, 研究方向为柔性电子可靠性测试与分析技术。

王凯旋, 硕士研究生, 研究方向为柔性电子器件可靠性测试技术。

徐祝青, 硕士研究生, 研究方向为质量管理与标准化。

朱明敏, 博士, 副教授, 研究方向为柔性电子器件设计、表征及应用。

朱海斌, 博士, 研究员, 研究方向为柔性电子测试与应用技术。

杨晓锋, 博士, 高级工程师, 研究方向为柔性电子失效分析技术及标准化。

周浩森, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为柔性电子可靠性。

马少鹏, 博士, 教授, 研究方向为AI+光测力学、柔性传感系统及其可靠性。

汤知源, 博士, 高级工程师, 研究方向为高性能纤维材料。

3. China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute; 4. Shanghai Jiao Tong University; 5. Zhejiang Institute of Quality Sciences; 6. Zhejiang Maimu Intelligent Technology Co., Ltd.)

Abstract: [Objective] Flexible semiconductor devices, with their inherent characteristics of being lightweight, thin-profile, and flexible, can be integrated with biological systems or equipment for diverse applications. However, the absence of relevant technical standards has hindered their in-depth expansion and widespread deployment across various sectors. Therefore, establishing and improving a comprehensive standards system for flexible semiconductor devices is urgently needed. [Methods] By reviewing the current status of standardization for flexible semiconductor devices both domestically and internationally, this paper systematically analyzed the challenges posed by industrial technological evolution to the standard system. A framework for the flexible semiconductor device standard system was constructed and categorized into six subsystems: fundamental and general standards, design standards, process standards, product standards, testing and evaluation standards, and application standards. [Results] The current standards system is characterized by a concentration of testing standards, yet overall insufficient coverage. To advance standards system development, several strategic pathways are proposed: establishing a rapid-response and forward-looking standard development paradigm, strengthening top-level design and coordination of standards, enhancing fundamental research and complex verification capabilities, and implementing a technology-standards-market integrated strategy. [Conclusion] A well-conceived and comprehensive standards system for flexible semiconductor devices offers a valuable reference for policymakers, regulators, researchers, and industry, thereby supporting the high-quality and stable development of flexible semiconductor technology.

Keywords: flexible electronics; semiconductor devices; standardization; standards system

0 引言

半导体作为高科技产业核心,与5G通信、自动驾驶、人工智能等技术的创新发展密切相关,是国家新型基础设施建设战略中的重要支撑,对国民经济增长具有显著推动作用^[1]。在新型举国体制及各地方专项政策引导下,国内半导体材料、先进封装及EDA软件等关键技术已取得重大突破,通过布局先进制程,发展成熟工艺,有效提升了半导体产能和自给率,同时,新能源汽车、人形机器人等新兴领域市场需求的迅速增长为半导体产业提供了广阔的应用空间^[2-3]。

柔性半导体器件是指通过微纳加工工艺将有机或无机半导体材料设计集成于柔性薄膜基底表面,所形成的具备一定功能和柔韧性的电子器件^[4]。相对于传统硬质电路,柔性半导体器件具有轻、薄、柔等显著特性,能够便捷地与生物体或装备融合应用,是后摩尔时代全面提升智

能感知、存储、信号处理及显示等功能的重要载体。依托一系列科技项目的持续支持,柔性半导体原理设计、制造工艺及应用技术呈现协同发展态势,器件功能与产品形态日趋多样化。丰富且严苛的应用场景对柔性半导体器件提出复杂的性能需求,但柔性半导体器件相关统一标准的缺失,制约了其在各个领域的深度拓展与规模化应用,亟须建立健全柔性半导体器件标准体系^[5]。工业和信息化部和国家标准化委员会2025年发布的《国家智能制造标准体系建设指南2024版》明确指出要加快制定电子器件及专用材料生产制造过程的互联互通要求和专用设备标准规范^[6]。

《2025年工业和信息化标准工作要点》要求持续完善包括柔性半导体器件在内的新兴产业标准体系建设^[7],前瞻布局未来产业标准研究,为柔性半导体器件从设计制备、测试评价到终端应用的标准化建设提供了指导方向。

综上,本文通过调研和分析国内外柔性半导

体器件相关标准的研制现状,结合产业技术发展情况,提炼柔性半导体器件标准体系建设过程中面临的挑战性问题,进而搭建兼顾柔性半导体器件产业技术要点与未来发展趋势的标准体系框架,提出相关发展建议,为柔性半导体产业高质量稳定发展提供标准化支撑。

1 国内外柔性半导体器件标准化现状

1.1 柔性半导体器件国际标准化现状

柔性半导体器件的国际标准主要由国际电工委员会(IEC)和国际半导体产业协会(SEMI)两大体系组成。二者分工明确、相辅相成,共同奠定了国际柔性半导体器件领域的规范化基础。

IEC作为全球电工电子领域公认的权威标准化机构,其标准化成果具有基础性、普适性和权威性^[8]。在柔性半导体器件领域,IEC下设的TC 47半导体器件标准化技术委员会负责相关标准制定工作,其核心成果是研制了IEC 62951《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件》系列标准。该系列标准针对“材料—器件—系统”的柔性特性建立了专用测试与评价方法,填补了此前柔性半导体器件方面的标准空白,是柔性半导体器件国际标准体系的基石。其中,IEC 62951-1《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第1部分:柔性基板上导电薄膜的弯曲试验方法》规范了柔性导电薄膜材料弯曲加载测试方法^[9],IEC 62951-4《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第4部分:柔性半导体器件基板上柔性导电薄膜的疲劳评价》规定了柔性导电薄膜在循环载荷下的疲劳性能评价方法^[10]。二者为量化柔性半导体材料在机械应力作用下的耐受性提供了直接的测试与评价依据。IEC 62951-5《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第5部分:柔性材料热特性测试方法》^[11]和IEC 62951-6《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第6部分:柔性导电薄膜的薄层电阻测试方法》^[12]则分别规定了柔性导电薄膜材料热特性和方阻的测试方法。对于易受湿气环境影响的有机

半导体薄膜封装材料,IEC 62951-7《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第7部分:柔性有机半导体封装薄膜阻挡特性测试方法》详细描述了薄膜封装阻隔性能的测试表征方法^[13],包括方法原理、装置及测试流程等。针对柔性电子产品中核心的功能性有源器件,IEC 62951-2《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第2部分:柔性器件的电子迁移率、亚阈值摆幅和阈值电压评价方法》^[14]和IEC 62951-3《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第3部分:柔性基板在凸起状态下的薄膜晶体管性能评价》^[15]分别规定了柔性薄膜晶体管在弯曲、凸起等变形状态下关键电学性能评估方法。此外,围绕技术前沿所涉及的柔性阻变存储器件,IEC对应制定了IEC 62951-8《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第8部分:柔性电阻存储器延展性、柔韧性和稳定性测试方法》^[16]和IEC 62951-9《半导体器件 柔性可拉伸半导体器件 第9部分:一晶体管一电阻式(1T1R)电阻存储单元性能测试方法》^[17],涵盖了柔性阻变存储器件柔性、可拉伸性、稳定性以及具体存储性能测试方法,这标志着IEC相关标准化工作已从柔性材料级拓展至新型信息器件级。

SEMI作为国际半导体制造供应链的全球性产业协会,其标准化活动具有鲜明的产业驱动和商业应用导向,与IEC的基础性定位形成鲜明互补。以半导体产业痛点和应用场景为牵引,SEMI标准的侧重点清晰指向“制造过程”与“系统集成”,旨在突破从半导体前期设计至后期量产及应用的瓶颈。围绕柔性半导体器件,SEMI于2020年批准成立了全球首个“柔性混合电子标准化技术委员会”,拟着力突破刚性硅基芯片、印刷电路与柔性基板、纺织物等异质材料进行集成时所面临的技术挑战。为构建覆盖柔性混合电子(Flexible Hybrid Electronics, FHE)全流程的标准生态,SEMI北美技术委员会于2023年一次性筹建了4个标准工作组,分别对应FHE产业化的4个核心环节,包括设计(建立基板、接口的系统级设计规范)、组装(研究导电胶、焊料等连接技术)、油墨表征

(保障印刷电子功能材料的来料可靠性)及可靠性测试(开发材料、组件和集成系统的测试流程),标志着相关标准化工作向着FHE规模化和高良率的生产制造方向发展。

以柔性电子器件在纺织品上的应用为导向,SEMI的FHE标准化技术委员会于2023年底迅速制定了全球首批针对电子织物的测试标准,包括SEMI FH1-0323《电子织物线阻抗测试方法》^[18]、SEMI FH2-0323《机织电子织物表面电阻测试方法》^[19]和SEMI FH3-0224《可穿戴设备控制模块连接器盐雾及可洗性测试流程指南》^[20]。这些标准直接服务于智能穿戴、智慧医疗等细分应用市场。3项标准旨在解决柔性电子器件与纺织物结合时的具体测试难题,降低了纺织业与电子业上下游企业之间的协作成本。此外,FHE标准化技术委员会持续拓展其标准的应用边界,进一步制定适用于可穿戴设备触觉特性评估的SEMI FH4-0724E《柔性混合电子材料和产品的触觉特性测试方法与指南》^[21],表明相关标准化工作同步向终端用户体验层面延伸,从而促进形成健康的FHE产业生态链。

当前,柔性半导体器件的国际标准化工作呈现出清晰的“双轮驱动、分层协作”模式。IEC和SEMI两大体系的标准化工作均已超越初期的术语定义和简单测试,并深入到可靠性评价、异质集成、工艺控制等产业化攻坚阶段。IEC的基础方法与SEMI的产业标准未来将紧密结合,共同向更细分的垂直应用领域(如可植入医疗设备、柔性车载电子)快速拓展,并与人工智能、生物电子等前沿技术进行交叉融合。对于全球参与者而言,深度参与当前动态发展的国际标准化工作,是在柔性电子技术革命中掌握技术主导权和市场话语权的关键。

1.2 柔性半导体器件国内标准化现状

相比于柔性半导体器件的国际标准体系,国内标准化工作正处于快速布局、积极跟进并寻求局部突破的动态发展阶段。当前,国内已初步形成了以“国家标准为基础牵引,团体标准为创新先

锋,行业标准尚在培育”为特征的立体化标准体系雏形,不仅加速与国际主流技术规范接轨,也结合国内实际产业需求进行自主创新^[22]。

柔性半导体器件国家标准主要由全国半导体器件标准化技术委员会(SAC/TC 78)组织编制。该技术委员会通过采标方式快速建立一套与国际接轨的柔性半导体器件基础性能与可靠性测评标准体系。目前,一系列柔性半导体器件国家标准制定计划正在全面推进中,已公开的立项信息显示,共9项相关国家标准计划等同采用IEC 62951系列第1部分至第9部分。该“等同采用”策略使国内研发机构、制造商和检测单位能够快速采用国际通行的技术语言和测试标尺,从而降低国内外的技术壁垒和贸易成本,保障了产品性能评价基准的一致性。同时,国家标准的制定过程也带动了国内产学研的深度融合。例如,在相关标准项目研制过程中,工业和信息化部电子第五研究所等国家级科研机构与柔检科技等地方企业共同参与起草和验证。该协作模式为标准的有效实施和迭代升级奠定了坚实的产业基础。

与国家标准侧重的基础和通用方法不同,团体标准具备制定灵活、市场响应速度快等特点,是国内柔性半导体标准化领域最具活力的组成部分。围绕具体产品可靠性、特定应用场景和产业链协同展开相关工作,填补了国家标准在应用层面的空白。由于产品形态多样,相关团体标准分散在不同协会平台发布。浙江省质量协会发布的T/ZZB Q039—2022《柔性显示模组抗冲击性能试验方法》^[23]和T/ZZB Q040—2022《柔性显示模组弯折性能试验方法》^[24],为柔性显示器件可靠性评估中的抗冲击和抗弯曲性能提供了规范的测试方法;中国电子学会发布的T/CIE 198—2023《柔性半导体集成电路可靠性试验规范》^[25]和T/CIE 199—2023《柔性半导体集成电路弯曲试验方法》^[26],提供了柔性半导体集成电路在可靠性试验中的一般要求、质量评定程序、鉴定试验和质量一致性试验流程,并针对柔性电路特有的抗弯曲性能提供了试验方法;浙江省分析测试协会发布的T/ZJATA 0030—2025《柔

性平面天线弯曲特性测试方法》，为柔性天线在弯曲工况下的射频性能提供了测试方法依据^[27]；针对柔性薄膜压力传感器的性能标定环节，全国城市工业品贸易中心联合会和浙江省分析测试协会分别发布的T/QGCML 4624—2024《柔性薄膜压力传感器标定测试方法》^[28]、T/ZJATA 0031—2025《薄膜压力传感器 压力-电信号标定试验方法》^[29]，规定了标定方法原理、试验装置、标定程序及数据处理方法。柔性半导体器件相关团体标准整体上展现出较大的自主性，在可靠性测试等具体领域已率先实现突破，旨在解决产业化中的实际工程问题。

由于柔性半导体技术本身具有跨学科、多行业交叉的特性，其应用分散在电子、纺织、医疗、汽车等多个领域，难以迅速归入某一传统行业标准体系。目前公开发布的专门针对柔性半导体器件的行业标准数量较少。此外，国内围绕柔性电子标准化的生态建设已经启动，学术界正发挥着重要的引领和推动作用。西北工业大学联合全国微机电技术标准化技术委员会（SAC/TC 336）牵头成立了柔性电子标准化研究组，汇聚高校院所及企业专家力量，从技术源头梳理标准需求并凝聚共识，为未来柔性半导体器件的标准制定提供智力支撑和人才储备。

2 柔性半导体器件技术演进对标准体系的挑战

柔性半导体技术发展迅速，从原理设计、材料科学、制造工艺到系统集成，各环节的创新不断突破传统刚性器件的物理边界与功能边界。技术迭代在催生新应用的同时，也对现有柔性半导体器件标准体系构成了多维度、系统性挑战。标准的滞后、碎片化及部分缺失，已成为制约柔性半导体产业规模化、高质量发展的关键问题之一。

2.1 技术快速迭代与标准制定周期长的矛盾

当前柔性半导体技术发展呈现多路径探索和快速迭代等显著特征。柔性半导体材料层面，高性能氧化物材料、可拉伸有机材料和碳纳米管等多

种材料体系处于并行探索阶段；工艺层面，减薄、转印、卷对卷印刷、激光剥离和硅胶注塑等非传统工艺方法不断涌现；器件层面，产品从可弯曲的薄膜晶体管（“Thin-Film Transistor”，TFT）向可拉伸和变形可恢复的柔性器件形态拓展；系统层面，产品形态从单一功能模块逐步向多功能、智能化和集成化系统演变，如电子皮肤、可穿戴的智能柔性贴片等。多层级、多方向的并行发展，与标准化工作固有的“寻求共识”和“追求稳定”属性之间形成根本性冲突，全新的柔性半导体技术从实验室研发到商用样机问世的平均周期约1~2年，但国家或国际标准研制周期通常需要3~5年，使得柔性半导体器件的“标准滞后”成为常态。

2.2 系统集成化与标准碎片化的矛盾

多功能集成化是柔性半导体技术的主要发展趋势。例如面向工业物联网的柔性多物理量监测系统、面向人形机器人的智能电子皮肤，均为集成传感、计算、通信、供能等功能的柔性微型系统，其系统级架构的规范化定义与多模块协同机制急需标准支撑。当前，各行业标准化组织分别围绕柔性技术特色和所在领域技术优势开展新标准研制。不同专业分工机制虽有利于发挥各领域技术优势，但在应对技术高度交叉的柔性集成化系统时，容易造成不同标准间的技术壁垒。例如机械应力性能方面关于弯曲半径、疲劳耐久性的定义易出现较大差异，电气接口协议可能互不兼容，数据交换格式与通信协议可能无法互通。此外，可靠性评价方面，依据各模块自身标准定义的寿命阈值与试验条件难以推导至系统级可靠性。柔性半导体标准的碎片化，使得柔性电子系统在较大程度上需依赖定制化设计与非标验证，大幅增加了研发成本与质量风险，延长了研发周期。

2.3 新型失效机制对传统评价体系的挑战

鉴于柔性半导体器件服役场景多样化且严苛化，其可靠性要求从应对简单温湿度环境应力逐渐转变为经受包括机械应力在内的多物理场耦合长期考验。由此引发的材料老化、界面分层、引脚断裂和电性能漂移等失效机制，催生了

区别于传统可靠性评价的新方法需求。当前面向柔性半导体器件可靠性测试、失效分析和寿命预测等技术方案尚不完善。由于柔性半导体器件的材料及服役形态与传统半导体器件存在差异,二者的应力加载测试方法与失效机理截然不同,即传统刚性半导体测试方法和失效分析工具无法直接适用于柔性半导体。虽然已有部分弯曲、拉伸等试验标准,但在试样形态、弯曲路径、温湿度环境同步加载等关键参数设置上并不统一。此外,实际应用工况(如折叠屏铰链处、柔性可穿戴设备的关节贴合部位等)下通常为机械应力、湿热及电载荷叠加的复杂应力状态,而现有标准多为单一机械应力类型,缺乏科学严谨的多场耦合条件下试验模型和标准方法,导致实验验证结果与产品真实服役寿命及失效模式之间存在显著偏差,也使得现有分立的柔性半导体测试方法难以匹配真实复杂工况。

2.4 先进工艺迭代对现有标准体系的挑战

柔性半导体器件制造工艺流程与传统刚性半导体器件存在较大差异,其工艺链条涵盖柔性基底制备、功能材料沉积、图案化转印及柔性封装等环节。随着柔性半导体技术向超薄化、大面积化、异质集成化方向演进,催生了一批新型制造工艺,现有工艺标准体系无法满足新的需求。在材料制备环节,柔性基底与功能材料等性能规范的缺失直接影响工艺稳定性。在沉积环节,卷对卷(Roll-to-Roll,“R2R”)印刷等新型工艺过程控制标准化的滞后,制约了其高质量、规模化生产。在图案化转印环节,随着芯片厚度减薄至数微米量级,无损转印工艺要求急剧提高,由于黏附力调控、剥离速度控制等工艺流程及参数缺乏统一规范指引,工艺良率难以得到保障。在封装环节,原子层沉积薄膜封装、硅胶注塑封装等新型工艺,以及聚酰亚胺、环氧树脂等封装材料具有显著的环境敏感性,但目前针对柔性封装界面黏附强度测试、水氧透过率测定、弯曲—交变湿热耦合老化试验等方法标准尚不完善。源自不同渠道的封装材料规格不统一,导致工艺参数和封装可靠性存在较大差异。

3 柔性半导体器件标准体系构建

3.1 标准体系构建目标

面向柔性半导体技术蓬勃发展过程中对指导性标准和参考规范的需求,全面梳理相关技术领域的既有标准,完善标准体系以确保其框架结构科学、合理且全面,能够前瞻性地覆盖柔性半导体器件全生命周期的技术逻辑和柔性特征,并适配形态多样化、集成化、智能化以及服役环境条件严苛化等未来发展趋势。以科学性、系统性、继承性、创新性和预判性原则为依据^[30],构建柔性半导体器件标准体系,支撑柔性半导体器件及相关柔性集成化电子系统的设计研发、生产制造、测试评价及产业化应用。

3.2 标准体系框架

基于柔性半导体器件从设计研发到产业应用的技术路径需求,分析其区别于传统刚性半导体的设计思路、制造工艺、性能测试与评价方法、产品形态及服役环境,构建其标准体系框架。本文遵循GB/T 13016—2018《标准体系构建原则和要求》,提出一套柔性半导体器件标准体系框架,供业内参考。结合柔性半导体器件多样化产品形态、减薄与注塑封装工艺、多物理场耦合的应用工况、失效机制及试验分析方法,将本框架划分为100基础通用标准、200设计标准、300工艺标准、400产品标准、500测试与评价标准和600应用标准共6个标准子体系,如图1所示。

根据上述柔性半导体器件标准体系框架划分的6个类别。其中,100基础通用标准用于统一柔性半导体器件的相关要求,解决基础共性关键问题,包括术语、分类与命名和通用要求3个体系类别;200设计标准用于明确柔性半导体器件设计环节的技术准则,解决设计参数散乱问题,包括电路设计、结构设计和接口与兼容性要求3个体系类别;300工艺标准用于明确柔性半导体器件制造流程及工艺参数要求,解决量产过程中工艺、质量及设备适配性问题,包括制造材料、工艺规范、过程

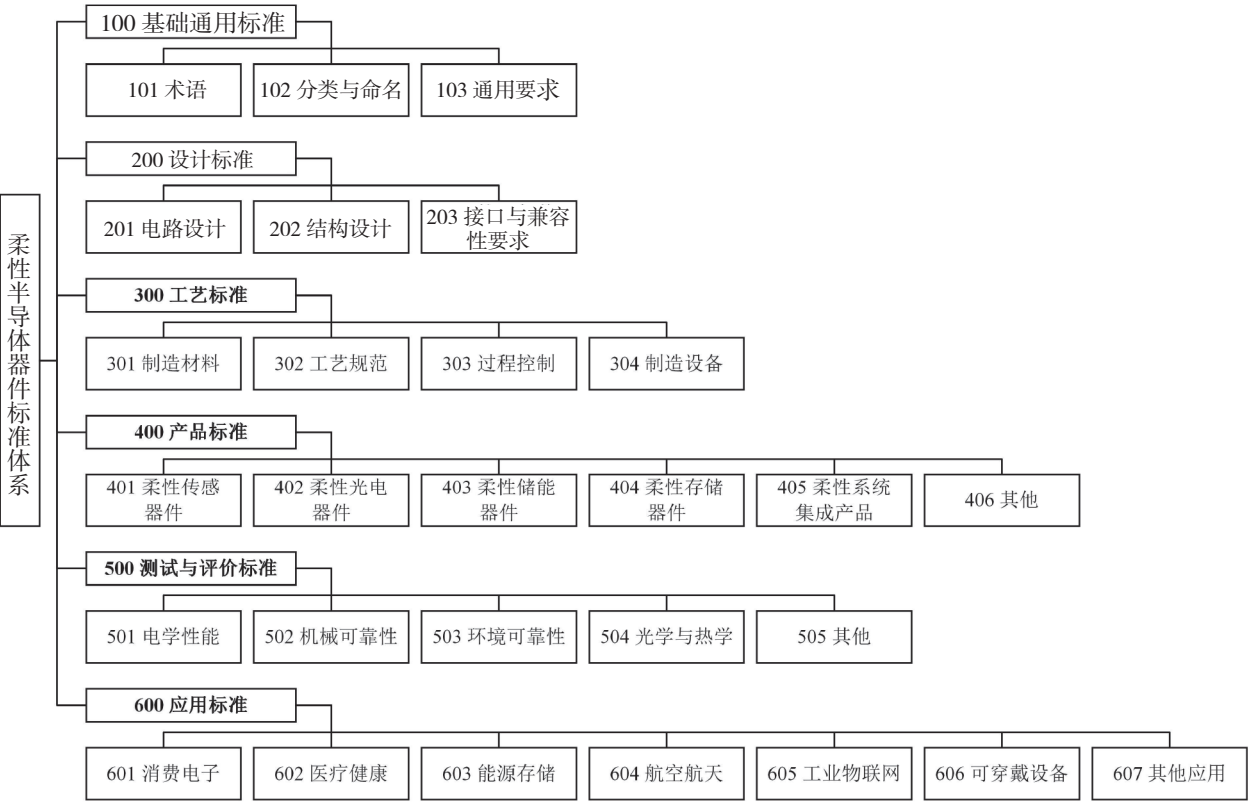


图1 柔性半导体器件标准体系框架

控制和制造设备4个体系类别；400产品标准用于规范各类柔性半导体产品的功能与性能指标，明确核心产品技术要求，包括柔性传感器件、柔性光电器件、柔性储能器件、柔性存储器件、柔性系统集成产品和其他产品6个体系类别；500测试与评价标准用于建立柔性半导体器件性能测评体系，提供性能与质量评价依据，包括电学性能、机械可靠性、环境可靠性、光学与热学和其他测试与评价5个体系类别；600应用标准用于规范柔性半导体器件与各应用场景的适配要求，解决跨领域适配与集成问题，包括消费电子、医疗健康、能源存储、航空航天、工业物联网、可穿戴设备和其他应用7个体系类别。标准体系类别详细说明见表1~表6。

3.3 标准数量统计与分析

通过查阅全国标准信息公共服务平台、工业和信息化部标准平台及全国团体标准信息平台，根据6个一级子体系类别对我国已发布标准及在研

表1 100基础通用标准类别内容		
体系编号	体系类别	标准内容说明
101	术语	柔性半导体器件涉及的基础术语与定义，与传统刚性半导体器件的术语区分规则
102	分类与命名	柔性半导体器件领域按功能、材料、形态、应用场景分类规则与器件型号命名规范
103	通用要求	柔性半导体器件的通用技术规范、环境适应性要求、安全与环保基本准则、文档与标识等规范

标准进行统计，如图2所示。现阶段柔性半导体器件标准体系涵盖国家标准、行业标准、团体标准共计74项。其中，已发布实施标准34项，在研标准40项。现行标准中测试与评价标准数量最多，其次为产品标准和应用标准，基础通用标准、设计标准、工艺标准数量偏少，尤其是柔性集成电路设计规

表2 200设计标准类别内容

体系编号	体系类别	标准内容说明
201	电路设计	柔性电路拓扑、布线、可弯折/拉伸电路形态设计、柔性TFT/CMOS电路设计等规范
202	结构设计	柔性基板选型、可弯折/折叠/拉伸结构、轻量化与薄型化结构、异形适配结构等规范
203	接口与兼容性要求	电气接口、机械接口、通信接口、跨器件/系统兼容性要求

表3 300工艺标准类别内容

体系编号	体系类别	标准内容说明
301	制造材料	柔性基板、导电/半导体/介电材料、封装材料、黏合材料、功能材料等规范
302	工艺规范	沉积、刻蚀、印刷、薄膜成型、异质集成、柔性封装等工艺规范
303	过程控制	工艺参数监控、洁净度、质量控制点、批次一致性、在线检测要求
304	制造设备	柔性印刷设备、转印设备、弯曲试验机等专业制造与测试设备的技术指标；设备校准、维护与操作规范

表4 400产品标准类别内容

体系编号	体系类别	标准内容说明
401	柔性传感器件	柔性压力/应变/温度/湿度传感器、柔性生物传感器等规范
402	柔性光电器件	柔性光电探测器、柔性LED/OLED、柔性太阳能电池、柔性光电转换器件等规范
403	柔性储能器件	柔性锂电池、柔性超级电容、柔性薄膜电池、柔性储能模组等规范
404	柔性存储器件	柔性电阻存储器、柔性相变存储器、柔性铁电存储器、柔性存储阵列等规范
405	柔性系统集成产品	柔性电路与组件集成、柔性传感—处理—驱动系统、柔性穿戴系统、柔性集成模组等规范
406	其他	其他柔性电子器件产品，如柔性连接器件、柔性射频器件等

表5 500测试与评价标准类别内容

体系编号	体系类别	标准内容说明
501	电学性能	电子迁移率、阈值电压、亚阈值摆幅、漏电流等核心电学参数测试方法；动态弯曲、拉伸等变形状态下电学性能稳定性评价方法
502	机械可靠性	极限弯曲半径、弯曲疲劳寿命、拉伸性能、柔韧性保持率等测试方法；弯折耐久性、抗撕裂性能等评价方法
503	环境可靠性	高低温循环、温湿度老化、盐雾腐蚀等环境试验方法；长期稳定性与加速试验模型
504	光学与热学	柔性光电器件的亮度、色域、视角等光学性能测试；透光率、发光效率、热导率、散热性能、热膨胀系数等热学性能评价方法
505	其他	生物相容性、电磁兼容性、环保合规等专项测试与评价方法

表6 600应用标准类别内容

体系编号	体系类别	标准内容说明
601	消费电子	柔性折叠屏、手环等消费级柔性电子产品应用规范
602	医疗健康	柔性生理体征监测、植入式等医疗级产品可靠性与安全规范
603	能源存储	柔性能源器件集成、储能系统适配、能源管理、户外能源应用等规范
604	航空航天	耐极端环境、轻量化、稳定性、航空/航天级应用规范
605	工业物联网	工业传感器/柔性电路、工业环境适应性、工业级可靠性/抗扰度规范
606	可穿戴设备	穿戴适配性、人体工学、佩戴稳定性、低功耗、便携化等应用规范
607	其他应用	汽车电子、智能纺织品、人形机器人等场景下的柔性器件应用规范

范、可拉伸器件结构设计指南等核心设计标准几乎空白。这表明现阶段柔性半导体器件标准体系初步成型但整体不足，未来亟须加快基础共性、设计、工艺、可靠性评价及场景化应用标准的研制，推动国际国内标准协同衔接，加快构建统一、协

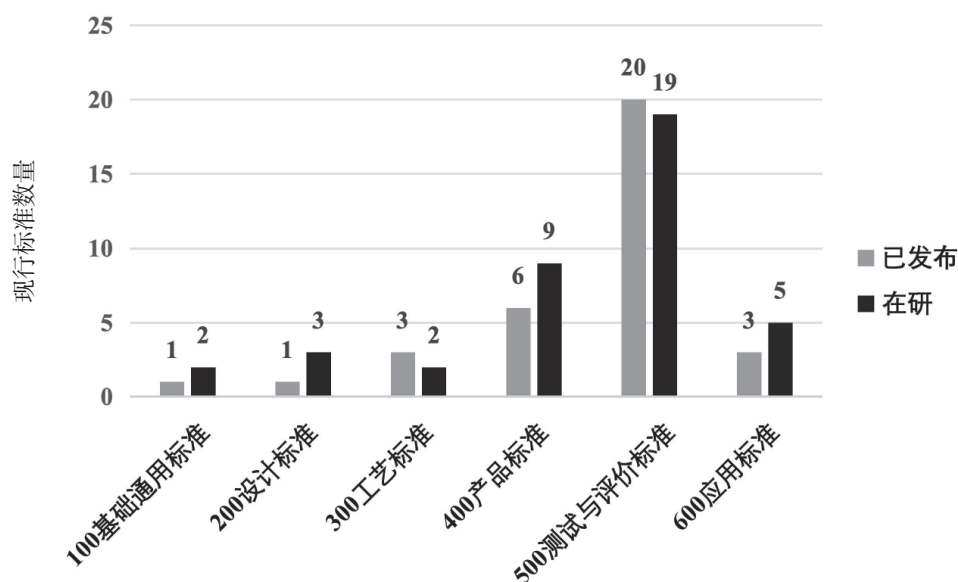


图2 柔性半导体器件标准数量统计

调、覆盖全链条的标准体系，以支撑产业高质量规模化发展。

4 标准体系发展建议

为有效应对柔性半导体器件技术快速演进带来的系统性挑战，推动产业健康、规模化发展，亟须对现有标准体系进行战略性优化与前瞻性布局。基于前述分析，现提出以下4个层面的发展建议。

(1) 构建快速响应与前瞻布局并行的标准研制范式，创新标准研制机制。首先，针对已形成产业共识的成熟技术路线，探索并建立关键共性标准的快速立项与发布机制，提升标准制修订效率。其次，紧密关注柔性半导体领域前沿研究动态，针对生物可降解柔性电子材料、柔性电子皮肤、柔性多物理量监测系统变革性方向开展标准化技术路线预研，变“后期被动跟随”为“前期主动引导”。

(2) 强化顶层设计与协同机制，推动“碎片化”标准研制向体系化迈进。拓展柔性半导体标准化工作组成员类型，使其覆盖柔性材料、半导体

器件、集成电路、微机电系统等多学科交叉领域，统筹规划系统级的标准研制路线，厘清柔性半导体器件方向与其他相关标准技术领域的标准化边界，着力制定关键接口协议和系统级性能评价方法等顶层标准，为柔性集成化电子系统的开发和应用提供清晰、明确的标准依据。

(3) 注重基础研究和复杂验证能力建设，应对机械应力和多场耦合条件给柔性半导体可靠性带来的全新挑战。一是鼓励和支持科研机构与企业联合攻关标准化难题，深入研究柔性材料与器件在复杂应力下的失效机理，建立科学的可靠性表征模型，为相关标准研制提供核心理论依据。二是倡导建设权威、专业的测试验证平台，形成能够模拟真实复杂工况（如弯曲—温湿度—电负载综合工况）的标准试验能力，为分场景（如消费级、航天级、医疗级等）的可靠性分析与评价标准提供坚实的数据基础。三是同步启动系统级可靠性研究，制定针对柔性异质集成系统的可靠性设计指南、失效模式与影响分析（Failure Mode and Effects Analysis, FMEA）框架，指导产业界从系统角度保障产品全生命周期的可靠性。

(4) 积极在国际标准制定中发挥主导作用。

围绕国内已形成全球竞争优势的产业方向,梳理技术亮点及创新实践案例,推动申报国际标准提案,将国内产业规模优势转化为国际标准影响力。针对国内已制定且技术水平相对领先的柔性半导体标准,可借助“一带一路”倡议标准化合作、区域标准组织等渠道向国际推广宣贯,构建“以领先技术支撑标准创新,以先进标准规范市场应用,以市场反馈驱动技术迭代”的标准化建设体系。

5 结论

柔性半导体器件标准体系在国际上已形成IEC与SEMI双轮驱动格局。IEC 62951系列标准构建了基础测试体系,SEMI聚焦柔性混合电子制造与应用,标准研制进入产业化关键阶段。国内形成以国标为主干、团标为先锋、行业标准待培育的多

层级标准协同建设模式,现存标准74项,其中已发布34项、在研40项,主要集中在测试与评价领域,基础通用、设计、工艺、产品、应用类标准仍相对薄弱,整体已覆盖核心测试方法与部分成熟场景需求,但在新兴器件与高端应用场景仍存在明显短板,系统集成需求与标准碎片化矛盾突出。本文基于柔性半导体器件主要特性及其产业发展趋势,结合国内外标准化组织在柔性半导体器件方面的标准研制动向,构建了一套全面的柔性半导体器件标准体系。该体系覆盖了柔性半导体器件全生命周期的关键环节,并对各环节的标准化需求进行详细分析,提出相关标准体系发展建议。当前柔性半导体技术商业化与标准化正处于蓬勃发展阶段,本文的探索旨在为政策制定者、行业监管机构、技术研究者和产业界提供参考,通过各方协作推动柔性半导体技术标准化进程,助力半导体产业的持续创新与稳定发展。

参考文献

- [1] PwC. Semiconductor and beyond: Global semiconductor industry outlook 2026[R/OL]. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/technology/pwc-semiconductor-and-beyond-2026-full-report.pdf>.
- [2] 李先军. “十五五”时期中国集成电路产业创新发展:外部形势、发展趋势与政策选择[J]. 改革, 2025(3): 38-52.
- [3] 于亚笛, 贾媛媛, 张育润, 等. 标准化支撑半导体产业链破解“卡脖子”难题的路径研究: 基于国家标准制修订情况的分析与思考[J]. 标准科学, 2025(7): 85-89.
- [4] 中国工程院全球工程前沿项目组. 全球工程前沿2020[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [5] 谢静, 刘嵩, 黄秀颀, 等. 柔性显示器件国际标准研制进展[J]. 信息技术与标准化, 2014(8): 67-69.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部, 国家标准化管理委员会. 国家智能制造标准体系建设指南(2024版)[Z]. 2025.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部办公厅. 2025年工业和信息化标准工作要点[Z]. 2025.
- [8] 徐平江, 邵瑾. IEC半导体标准体系研究[J]. 标准科学, 2025(S2): 184-191.
- [9] IEC 62951-1:2017 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 1: Bending test method for conductive thin films on flexible substrates[S].
- [10] IEC 62951-4:2019 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 4: Fatigue evaluation for flexible conductive thin film on the substrate for flexible semiconductor devices[S].
- [11] IEC 62951-5:2019 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 5: Test method for thermal characteristics of flexible materials[S].
- [12] IEC 62951-6:2019 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 6: Test method for sheet resistance of flexible conducting films[S].
- [13] IEC 62951-7:2019 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 7: Test method for characterizing the barrier performance of thin film encapsulation for flexible organic semiconductor[S].

- [14] IEC 62951-2:2019 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 2: Evaluation method for electron mobility, sub-threshold swing and threshold voltage of flexible devices[S].
- [15] IEC 62951-3:2018 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 3: Evaluation of thin film transistor characteristics on flexible substrates under bulging[S].
- [16] IEC 62951-8:2023 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 8: Test method for stretchability, flexibility, and stability of flexible resistive memory[S].
- [17] IEC 62951-9:2022 Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 9: Performance testing methods of one transistor and one resistor (1T1R) resistive memory cells[S].
- [18] SEMI FH1-0323 Test Method of Line Impedance for Electronic Textiles[S].
- [19] SEMI FH2-0323 Test Method of Sheet Resistance for Woven Electronic Textiles[S].
- [20] SEMI FH3-0224 Guide for Salt Mist and Washability Test Flow for Control Module Connector of Wearables[S].
- [21] SEMI FH4-0724E Test Method and Guide for the Tactile Characteristics of Flexible Hybrid Electronics Materials and Products[S].
- [22] 易婷婷, 胡关子. 中国标准化战略分层结构及展望: 以《国家标准化发展纲要》为例[J]. 标准科学, 2023(8): 6-12.
- [23] T/ZZB Q039—2022 柔性显示模组抗冲击性能试验方法[S].
- [24] T/ZZB Q040—2022 柔性显示模组弯折性能试验方法[S].
- [25] T/CIE 198—2023 柔性半导体集成电路可靠性试验规范[S].
- [26] T/CIE 199—2023 柔性半导体集成电路弯曲试验方法[S].
- [27] T/ZJATA 0030—2025 柔性平面天线弯曲特性测试方法[S].
- [28] T/QGCML 4624—2024 柔性薄膜压力传感器标定测试方法[S].
- [29] T/ZJATA 0031—2025 薄膜压力传感器 压力-电信号标定试验方法[S].
- [30] 华松逸, 魏敬和. 芯粒标准体系构建研究与探讨[J]. 信息技术与标准化, 2025(4): 95-100.