

# 芯片产业全生命周期质量管理研究

刘莹<sup>1,2</sup>, 廖武名<sup>1</sup>, 周业华<sup>1</sup>, 周信光<sup>1\*</sup>, 成岩<sup>2\*</sup>

1. 深圳市北测检测技术有限公司, 广东 深圳 518000

2. 华东师范大学物理与电子科学学院, 上海 201100

DOI:10.61369/ETQM.2026010019

**摘要:** 芯片作为手机、电脑、汽车等数码产品的关键零件对产品具有重要影响。本文将从芯片的设计、制造与封装、测试与验证、质量检测技术和质量管理五个方面, 系统的阐述芯片产业质量管理的现状。虽然六西格玛、IPD模式、机器视觉与深度学习等方法已经在芯片生成的不同阶段得到应用。但仍存在着芯片产业链上下游信息共享不足、高端设备依赖进口、供应链稳定性差、研发过程质量管控难度大、缺乏复合型人才等问题。本文提出应建立覆盖全生命周期的数字化质量管理平台, 通过智能检测推动工艺改进, 增加供应链的抗风险能力, 结合产学研共同培养复合型人才来解决目前存在的问题。

**关键词:** 芯片; 质量管理; 全生命周期

## Quality Management of the Whole Life Cycle of Chip Industry

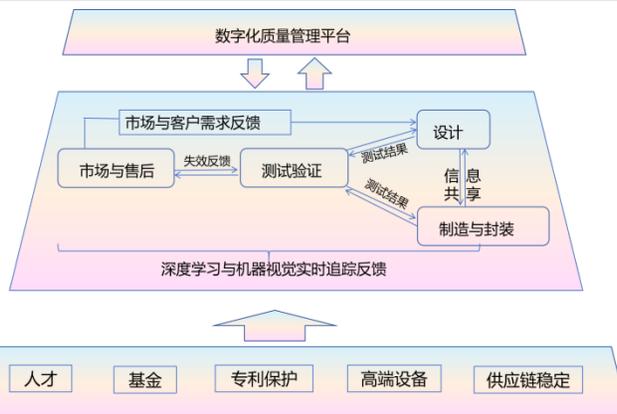
Liu Ying<sup>1,2</sup>, Liao Wuming<sup>1</sup>, Zhou Yehua<sup>1</sup>, Zhou Xinguang<sup>1\*</sup>, Cheng Yan<sup>2\*</sup>

1. Shenzhen Beice Testing Technology Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518000

2. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 201100

**Abstract:** As critical components in digital products such as smartphones, computers, and automobiles, chips play a pivotal role in product development. This paper systematically examines the current state of quality management in the chip industry through five key dimensions: chip design, manufacturing and packaging, testing and validation, quality inspection technologies, and quality management practices. While methodologies like Six Sigma, IPD (Integrated Product Development), machine vision, and deep learning have been implemented across various stages of chip production, persistent challenges remain. These include insufficient information sharing between upstream and downstream supply chain partners, heavy reliance on imported advanced equipment, unstable supply chain networks, difficulties in quality control during R&D processes, and a shortage of interdisciplinary professionals. To address these issues, the paper proposes establishing a digital quality management platform that spans the entire product lifecycle. By leveraging intelligent inspection systems to drive process optimization and enhancing supply chain resilience, combined with industry-academia-research collaboration to cultivate versatile talent, the proposed framework aims to create a robust solution for modern semiconductor challenges.

**Keywords:** chip; quality management; whole life cycle



作者简介:

刘莹 (1989.05-), 女, 博士, 研究方向: 芯片失效分析;

廖武名 (1985.01-), 男, 学士, 副高, 研究方向: 芯片失效分析;

周业华 (1977.08-), 男, 学士, 中级, 研究方向: 芯片失效分析;

周信光 (1990.04-), 男, 博士, 副高, 研究方向: 芯片失效分析;

成岩, 女, 博士, 教授, 研究方向: 新型存储器技术。

## 引言

芯片是当今手机、电脑、汽车等数码产品的关键零件，其质量水平对产品具有重要影响。但是，芯片领域具有高密度的技术要求、工艺流程复杂、产业链长的特点，因此质量管理是一个贯穿芯片设计、制造、封装、测试和售后服务的全生命周期工作<sup>[1-3]</sup>。一个细小的缺陷都会引起产品的失效，从而造成巨大的经济损失<sup>[4,5]</sup>。

为了应对这一挑战，大量相关人员针对芯片质量管理开展了研究。相关研究已覆盖芯片设计<sup>[6-8]</sup>、制造与封装<sup>[9-12]</sup>、测试与验证<sup>[13-15,21]</sup>等芯片生产的各个关键阶段。将六西格玛<sup>[12,21-22]</sup>、精益生产<sup>[22-23]</sup>与IPD模式<sup>[8,24]</sup>等现代质量管理与项目管理理论，并融合机器视觉<sup>[16-17]</sup>、深度学习<sup>[16,18-20]</sup>等先进检测手段提升质量管控的水平。

但是现有研究只集中在某些特定的难题，缺少芯片全生命周期质量管理的研究。因此，本文将通过各产业链环节的焦点进展、方法与技术的实践与局限、未来面临的共性挑战与机遇、优化建议与发展趋势来为后续研究构建质量管理知识体系。

## 一、芯片产业质量管理研究现状分析

### （一）芯片设计阶段的质量管理

王苑<sup>[6]</sup>以MXF芯片设计为研究对象，发现在设计阶段引入质量管理可有效提高芯片的一次流片成功率并降低返工次数。陈小华<sup>[1]</sup>为了满足车规级芯片的高要求，通过改进公司的研发质量管理体系，不仅缩短了芯片的研发周期，还减少了由于要求不明确而导致的变更成本。高成虎<sup>[7]</sup>发现在设计阶段与上下游不同企业之间进行信息共享可有效降低设计风险，减少设计缺陷率。王俊霞<sup>[23]</sup>通过增加对验证环节的质量管理，可有效识别芯片在设计阶段的缺陷。谭兰兰<sup>[24]</sup>与龙萌萌<sup>[8]</sup>引入集成产品开发（IPD）模式可促进跨部门协作与流程的标准化，缩短芯片研发周期、降低跨部门的沟通成本，减少设计阶段的返工。

### （二）制造与封装工艺的质量管理

制造与封装是芯片的核心环节，贾利娟<sup>[9]</sup>通过建立供应商质量管理体系，有效提高了原材料的来料合格率。郑明杰<sup>[4]</sup>针对封装中的多种缺陷，开发了一种高精度检测技术，可准确识别出封装过程中产生的划痕、溢胶、坑洼、破损等多种缺陷；众多研究者通过对关键工艺参数的管理，提高了高压IGBT模块的可靠性和使用寿命<sup>[10]</sup>。吴亚楠<sup>[26]</sup>与王祥<sup>[27]</sup>通过改进生产流程的质量管理，降低了芯片制造过程中的缺陷率，有效提升了产线良率。周方明<sup>[11]</sup>通过激光视觉传感器实现了生产过程中焊缝的寻位与实时跟踪。周超<sup>[28]</sup>研究了铜基键合丝的键合工艺，得到了工艺参数与键合强度之间的关系，提高了封装的可靠性。江浩轩<sup>[12]</sup>将六西格玛方法引入LED封装封装过程控制，通过DMAIC流程降低了缺陷率，证明了六西格玛在封装过程管理的有效性。此外，周海洋<sup>[29]</sup>对汽车级芯片封装与质量管理进行了描述，张柯<sup>[30]</sup>对芯片封装质量管理进行了设计，这些研究共同反映了芯片行业质量管理的发展历程。

### （三）测试与验证阶段的质量管理

兰永伟<sup>[13]</sup>通过对测试关键节点的控制，有效地提高了芯片测试结果的一致性。王柱<sup>[2]</sup>通过对芯片测试项目的质量管理，降低了芯片测试的错误率。杨阳<sup>[14]</sup>通过对测试进度计划的控制，建立了进度监控与预警系统，确保了测试任务的按时完成。万金磊<sup>[31]</sup>研究了一种芯片低成本测试方法，通过优化测试向量与流程，不

仅能保证芯片缺陷检出率，还大大缩短了芯片的测试时间，为大规模生产提供了可行性方案。

### （四）检测阶段的质量管理

先进的检测技术是实现质量管理的重要手段之一。王妍<sup>[32]</sup>将深度学习引入芯片外观缺陷检测中，该模型在复杂背景下可实现对微小缺陷的识别，并且准确率和效率明显高于传统方法。张金宇<sup>[17]</sup>与陈恺等<sup>[18-20]</sup>通过机器视觉提出了一种芯片表面缺陷自动识别方案，可对多种典型缺陷实现自动化筛查。饶永明<sup>[33]</sup>研究了芯片表面印刷符号的直观评价方法，提高了机器评价与人工判定的一致性。高玉<sup>[34]</sup>研究了芯片制造检测设备的发展历程，分析了检测技术对芯片质量的重要作用，为相关企业的决策提供了参考依据。

### （五）质量管理体系与方法论的构建

张龙殿<sup>[21]</sup>通过六西格玛质量管理提高了芯片的良率，良率从92.5%提高到96.8%。陈宸<sup>[22]</sup>利用精益六西格玛方法，制定了降低产品良率波动的目标，提高了芯片的一次通过率。冯振<sup>[23]</sup>通过建立了从原材料到成品的全链条质量管理体系，实现了全周期的质量管理量化指标。王晓<sup>[35]</sup>研究了华芯半导体公司的全面质量管理体系，并将质量意识融入在企业文化和日常管理中。王花朋<sup>[36]</sup>在芯片研发阶段增加了质量管理流程，减少了设计缺陷向后续环节的传递。朱晨清<sup>[37]</sup>将质量管理扩大到售后服务环节，客户反馈推动服务的改进，有效提高了客户满意度。董朝阳<sup>[38]</sup>分析了芯片材料专利保护对技术创新和芯片质量提升的促进作用。冷紫莹<sup>[39]</sup>指出增加国家投入可推动芯片产业质量提高。郭奎芳<sup>[40]</sup>指出未来五年内，芯片产业对“技术+质量”复合型人才的需求缺口预计超过10万人，而美国将缺少6.7万人<sup>[41]</sup>。因此校园教育应为芯片产业提供即具备质量管理意识又具有专业知识的复合型人才。综上所述，通过将质量管理工具运用到芯片从研发到服务的全生命周期，并在文化、专利与人才的共同支持下，可实现芯片质量与可靠性的提高。

## 二、芯片质量管理存在的问题与挑战

### （一）产业链信息共享不足

芯片产业链条长、专业分工明细，设计、制造、封装、测试

等环节通常是由不同企业进行，因此容易在各环节之间产生信息不对等问题。高成虎 [7] 在对芯片设计公司供应链的研究中指出，若设计与制造环节之间的质量标准要求不统一，则会大大影响芯片的生产良率。王俊霞 [25] 的研究也表明，设计部门与测试部门之间的需求传递和反馈机制滞后，会使潜在的设计缺陷流入下游环节。马婧雯 [9] 在对研发风险的分析中，将信息隔阂列为项目主要风险之一。跨企业跨环节的信息共享困难大大增加了芯片质量问题。因此应建立一致性控制的质量标准化策略 [3]。

### （二）高端设备依赖出口

芯片制程的后摩尔时代及 3D 封装技术的发展，对芯片缺陷检测的精度、速度和对复杂应用的适应性提出了更高要求。目前，芯片产业的先进的设备主要依赖于进口。高玉 [34] 对检测设备研究指出我国正处于追赶阶段，国内芯片制造检测设备市场中，国产化率仍不足 20%，高端设备依赖进口。在检测技术方面，王妍 [32] 与张金宇 [17] 分别讨论了深度学习与机器视觉在芯片缺陷检测中的应用，但这种智能检测方法在实际产线中仍面临着训练数据不足、模型适应性差等困难。

### （三）供应链不稳定

政治因素也会对芯片的产业链造成威胁。贾利娟 [9] 在供应商质量管理中指出，供应商的单一或过度集中都会对芯片质量造成威胁。这不会影响芯片的交付，还会影响芯片的质量。高成虎 [7] 的研究也提出供应链的不稳定会对芯片质量产生影响。

### （四）芯片研发周期与质量控制矛盾突出

芯片研发具有投资大、周期长的特点，但市场又要求芯片的快速迭代，如何平衡二者之间的关系是质量管理的一大难题。陈小华 [1] 在对汽车芯片的研究中发现，车规级芯片的高要求，与紧张的研发周期之间存在矛盾。马婧雯 [9] 的研究表明，研发过程中的疏漏会造成项目的延期或失败。王花朋 [36] 揭示了芯片研发质量管理的根本问题在于：企业大部分都是被动的末端测试管控，没有在前端设计阶段提前预防，至今仍是行业尚未完全解决的问题。

### （五）缺少复合型人才

芯片质量管理涉及到微电子、材料、机械、统计学和管理学等多个不同学科，因此芯片产业需要大量的复合型人才。郭奎芳 [40] 指出未来五年内，芯片产业对“技术+质量”复合型人才的需求缺口预计超过 10 万人，而美国将缺少 6.7 万人 [41]。因此校园教育应为芯片产业提供即具备质量管理意识又具有专业知识的复合型人才。当前教育体系缺少对即掌握芯片技术背景又掌握现代质量管理知识人才的培养。这种人才缺口使企业在推行六西格玛 [12,21,22]、精益生产 [22-23] 等质量管理方法时受到阻碍，也影响售后服务水平 [37]。

### （六）知识产权与持续创新不足

芯片质量的提升离不开科学技术的不断革新，而科学技术革新又依赖于知识产权的保护。董朝阳 [38] 对芯片材料专利保护的研究表明，目前在基础材料和制造工艺仍存在着知识产权保护不足的问题，这对企业开展长期的质量管理投入的积极性产生消极影响。冷紫莹 [39] 的研究表明，国家投入对芯片的创新具有促进作用，但如何将投入有效转化为持续的革新能力仍是一个长期的挑战。

## 三、优化建议与发展趋势

### （一）推进全生命周期数字化质量管理平台建设

构建覆盖芯片设计、制造、封装到测试全流程的数字化平台，是促进芯片产业链发展的重要方法之一。这需要将质量管理从局部扩大到至全产业链。芯片设计 [6]、芯片的研发 [1] 以及对制造质量 [27] 的研究，均表明了对全生命周期数字化质量管理平台的需求。通过建立统一的数字化平台，可以实现质量信息的共享，使供应商质量 [9]、测试结果 [13]，以及工艺缺陷数据 [4] 均为基于数据的质量分析提供有力支持。

### （二）深耕先进工艺与智能检测技术，提升质量管控精度

在制造与封装环节的质量管理需要持续迭代。高压 IGBT 封装 [10]、键合工艺 [28]、以及对激光微焊缝 [11] 的研究均为特定工艺的质量提升提供了有力支持。深度学习模型 [32]、机器视觉系统 [17] 和视觉检测 [18-20] 关键技术，不仅是检测工具，更应作为全生命周期质量数据采集与分析的核心技术，包含设证、生产过程监控、封装、测试等环节，形成“检测-反馈-优化”闭环。

### （三）强化供应链韧性管理与项目风险管理

灵活的供应链质量管理体系可有效地应对全球政策的不确定性。如供应链协同方案 [7] 与供应商管理 [9] 方法，构建了多源供应和透明管理的供应链管理网络。马婧雯 [5] 提出对研发过程中的各类风险进行提前识别和提前应对。

### （四）创新项目管理模式与低成本测试策略

研发与测试环节仍然离不开质量管理。如谭兰兰 [24] 和龙萌萌 [8] 研究的 IPD 模式，通过跨职能团队协作可提高研发效率与芯片质量。万金磊 [31] 提出的低成本适应性测试方法，在确保测试覆盖率的前提下，降低测试成本。再结合杨阳 [14] 对测试项目进度管理的研究，可实现保证测试质量的同时达到控制成本的效果。

### （五）构建产学研融合的人才培养与创新生态

人才是实施质量管理的基础。需要学校教育培养既有芯片技术背景又有质量管理知识的专业人才。完善专利保护机制 [38]，再加上投资的引导作用 [39]，可完善产业链中的薄弱环节，为高质量芯片产业良性发展提供支持。

### （六）推广先进质量管理方法并延伸至服务环节

张龙殿 [21] 与陈宸 [22] 将精益六西格玛的应用范围从生产制造扩大到了设计开发 [8] 和售后服务 [37] 环节。冯振 [23] 和王晓 [35] 在生产与全面质量管理方面的研究，为实施质量管理提供了参考依据。建立能覆盖产品全生命周期的质量管理，不仅能使产品质量符合标准要求，更能满足用户的需求。

## 四、结论

本文综述了芯片产业质量管理的研究现状。目前我国已形成设计、制造与封装、测试与验证、质量检测技术和质量管理体系等主要环节的质量管理体系，并在六西格玛、IPD 模式、机器视觉与深度学习检测等管理方法上取得进展。但是仍存在产业全链条信息沟通不足、高端检测装备依赖进口、供应链不稳定、研发质

量风险高、缺乏复合型人才等问题。为了解决这些问题需要做到以下几点：（1）企业从局部改进转向全产业链协同工作；（2）建立覆盖芯片全生命周期的数字化质量管理体系；（3）推进智能检测与工艺改进相结合；（4）加强供应链稳定性与项目风险管

理；（5）并注重人才培养与产业环境建设。本研究建立的综述框架可为后续研究者提供参考，也为企业管理者推进质量管理体系的建设提供思路。

## 参考文献

- [1] 陈小华. A公司汽车芯片研发质量管理优化研究[D]. 广东工业大学, 2024.
- [2] 王柱. H公司集成电路芯片测试项目质量管理改善研究[D]. 浙江大学, 2023.
- [3] 王豪. 人工智能芯片生产过程中的质量标准化策略[J]. 中国品牌与防伪, 2025, (10): 143-145.
- [4] 郑明杰, 潘桥, 许海燕. 基于深度学习的芯片封装缺陷检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(08): 45-53.
- [5] 马婧雯. 半导体芯片研发项目的风险管理[D]. 厦门大学, 2022.
- [6] 王苑. G公司 MFX 芯片设计项目质量管理研究[D]. 大连理工大学, 2024.
- [7] 高成虎. T 芯片设计公司供应链质量管理优化研究[D]. 华东师范大学, 2024.
- [8] 龙萌萌. IPD 模式下芯片产品研发项目质量管理改进研究[D]. 北京邮电大学, 2021.
- [9] 贾利娟. S 企业供应商质量管理改善方案研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [10] 陈利. IGBT 的研究与进展[J]. 中国集成电路, 2022, 31(12): 13-23+28.
- [11] 周方明, 蒋尊宇, 陈琪昊, 等. 基于激光视觉的焊接机器人离线自动编程技术[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(03): 37-41.
- [12] 江浩轩, 欧淑, 柏子尧, 等. 基于 DMAIC 模型的中小企业产品质量改进研究[J]. 价值工程, 2023, 42(32): 45-47.
- [13] 兰永伟. M 公司芯片测试项目质量管理优化研究[D]. 西华大学, 2024.
- [14] 杨阳. A 企业芯片测试项目进度计划和控制研究[D]. 电子科技大学, 2023.
- [15] 宋旻皓. 集成电路芯片测试项目质量管理研究[D]. 华东理工大学, 2014.
- [16] 王妍. 基于深度学习的芯片外观缺陷检测模型研究[D]. 天津工业大学, 2023.
- [17] 张金宇, 朱立军, 林紫强. 基于机器视觉的晶圆表面缺陷检测方法研究[J]. 计算技术与自动化, 2025, 44(03): 94-99+122.
- [18] Chen K, Zhou Y, Zhang Z, et al. Multilevel image segmentation based on an improved firefly algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016.2016(pt.2):1-12.
- [19] Chen K, Zhang Z, Chao Y, et al. Defects extraction for QFN based on texture detection and region of interest selection[M]. Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering. Springer Singapore, 2016.119-126.
- [20] Chen K, Zhang Z, Chao Y, et al. Defects extraction for QFN based on mathematical morphology and modified region growing[C]. Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 2426-2430.
- [21] 张龙殿. 基于六西格玛管理的 J 公司 PMU 质量改进研究[D]. 江苏科技大学, 2023.
- [22] 陈宸. L 半导体公司产品质量精益六西格玛管理研究[D]. 电子科技大学,
- [23] 冯振. IIT 公司生产质量管理改进研究[D]. 大连理工大学, 2021.
- [24] 谭兰兰. X 芯片公司预研项目管理优化策略研究[D]. 中南财经政法大学, 2022.
- [25] 王俊霞. K 公司芯片验证项目管理研究[D]. 北京交通大学, 2022. DOI: 10.
- [26] 吴亚楠. S 公司芯片制造质量改善研究[D]. 北京邮电大学, 2023.
- [27] 王祥. I 公司芯片制造质量管理改进研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- [28] 周超. 铜基键合丝成球质量及键合工艺研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [29] 周海洋. 汽车级芯片封测、失效分析及质量管理[D]. 天津大学, 2012.
- [30] 张柯. W 公司芯片封装质量管理体系设计[D]. 北京化工大学, 2008.
- [31] Tai Song, Huaguo Liang, Tianming Ni, Zhengfeng Huang, Yingchun Lu, Jinlei Wan, Aibin Yan, "Pattern Reorder for Test Cost Reduction Through Improved SVM-RANK Algorithm," [J] IEEE Access, vol. 8, pp. 147965-147972, 2020.
- [32] 王妍. 基于深度学习的芯片外观缺陷检测模型研究[D]. 天津工业大学, 2023.
- [33] 饶永明, 吴帅, 同峰, 等. 芯片表面印刷符号结构缺陷的质量评估方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(09): 1642-1649.
- [34] 高玉. DF 公司芯片制造检测设备产品战略研究[D]. 中央财经大学, 2023.
- [35] 王晓. 华芯半导体公司质量管理研究[D]. 吉林大学, 2018.
- [36] 王花朋. A 公司芯片研发项目质量改进研究[D]. 北京理工大学, 2016.
- [37] 朱晨清. D 公司半导体设备售后服务质量管理改进研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- [38] 董朝阳. 加强新材料专利保护势在必行[N]. 中国知识产权报, 2019-12-11(5).
- [39] 冷紫莹. 国家集成电路投资基金投资对芯片行业研发创新影响研究[D]. 江西财经大学, 2020.
- [40] 郭奎芳. 芯片产业视域下高职生职业能力的现状及培养策略研究[D]. 天津职业技术师范大学, 2024.
- [41] 美国半导体行业协会称, 2030 年美国半导体行业人才缺口将达 6.7 万人[J]. 金属功能材料, 2023, 30(04): 58.