

Construction and practice of quality management system for automotive-grade semiconductor under the goal of zero defect

Lin Xiao

Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan, 412001, China

Abstract

Amid the automotive industry's "New Four Modernizations" initiative, automotive-grade semiconductor quality and reliability have become life-critical determinants. Traditional inspection-focused quality control models struggle to meet the market's near-zero defect rate demands. This study establishes a "zero-defect" automotive-grade semiconductor quality management system that integrates AEC-Q100 and IATF 16949 standards across the entire product lifecycle. The framework systematically addresses four dimensions: cultural practices, operational processes, tooling solutions, and data analytics. Through a new energy vehicle's main-drive IGBT power module development case, the system's application in New Product Involvement (NPI) processes is demonstrated. Core tools including Fault Tree Analysis (FTA), Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), and Statistical Process Control (SPC) are analyzed for their synergistic mechanisms and implementation effectiveness. Practical results show the system significantly improves Process Capability Index (CPK), controls production defect rates (PPM) to single-digit levels, and reduces early defect rates. This provides semiconductor manufacturers with a highly actionable theoretical model and practical roadmap to achieve automotive-grade "zero-defect" standards.

Keywords

zero defect; automotive-grade semiconductor; quality management system; fault tree analysis (FTA); failure mode and effect analysis (FMEA)

零缺陷目标下车规级半导体质量管理体系的构建与实践

肖琳

株洲中车时代半导体股份有限公司, 中国·湖南株洲 412001

摘要

在汽车产业“新四化”浪潮的推动下,车规级半导体的质量与可靠性已成为关乎生命安全的决定性因素。传统以检验为主的质量控制模式难以实现市场对缺陷率近乎零的极致要求。本文旨在构建并实践一个以“零缺陷”为引领,深度融合汽车行业AEC-Q100与IATF 16949标准,并覆盖全生命周期的车规级半导体质量管理体系。文章系统性地提出一个涵盖文化、流程、工具与数据四大层次的体系框架。通过新能源汽车主驱IGBT功率模块的开发案例,剖析了该体系在新产品导入(NPI)过程中的应用,重点展示了故障树分析(FTA)、失效模式与影响分析(FMEA)、统计过程控制(SPC)等核心工具的联动机制与实施效果。实践表明,该体系能显著提升过程能力指数(CPK),将量产缺陷率(PPM)控制在个位数水平,有效降低早期失效率,为半导体企业达成车规级“零缺陷”目标提供了具有高度可操作性的理论模型与实践路径。

关键词

零缺陷;车规级半导体;质量管理体系;故障树分析(FTA);失效模式与影响分析(FMEA)

1 引言

1.1 研究背景与紧迫性

汽车产业正经历电动化与智能化的深刻变革,其核心驱动力是半导体芯片。从核心控制到高级驾驶辅助系统(ADAS)、电池管理系统(BMS)等,芯片的性能与可靠

性直接决定了整车的功能与安全水平。这一趋势使得单车芯片用量激增,并对芯片的工作环境、寿命及可靠性提出了远高于消费电子产品的苛刻要求。

然而,半导体制造是工序繁多、技术高度复杂的超精密过程,内在的变异源无处不在。任何单一环节的微小偏差都可能在后续流程中被逐级放大,最终导致产品功能失效。此类失效在消费电子领域可能仅造成不便,但在汽车应用中则可能导致严重后果。因此整车厂(OEM)对半导体供应商的要求已从“可接受的质量水平(AQL)”转向了对“零缺陷”(PPM甚至PPB级)的极致追求。在此背景下,构

【作者简介】肖琳(1991-),女,中国湖南湘乡人,本科,助理工程师,从事大功率半导体行业质量、电子信息研究。

建一套能够系统性预防缺陷、确保产品全生命周期可靠性的质量管理体系，不仅是进入汽车供应链的准入证，更是企业构筑核心竞争力的战略支点。

1.2 现有研究述评

学术界与产业界在车规级质量管理领域已形成一定研究积累，主要聚焦于三个层面：一是可靠性物理与测试技术，如针对电迁移等失效机理的建模与加速寿命试验方法；二是特定质量工具在半导体制造中的应用，如利用 SPC 监控关键工艺参数；三是对 AEC-Q100 等行业标准的解读与符合性实践。

这些研究虽具价值，但普遍存在系统性不足。多数工作或侧重技术细节，或局限于单一环节，未能将“零缺陷”目标、车规标准体系、多种质量工具的方法论及企业日常运营有机整合，缺乏一个能全面指导实践的整体框架。

1.3 本文研究路径与价值

本文旨在弥补上述研究空白，将“零缺陷”视为贯穿始终的管理哲学。核心内容是构建一个多层级的动态质量管理体系模型，并通过一个完整的 NPI 案例实证其应用价值与成效。本研究旨在为半导体企业，特别是致力于进入汽车领域的本土企业，提供一套兼具理论高度与实践深度的参考范式。

2 理念基石：车规标准与“零缺陷”哲学的融合

2.1 车规级质量标准的“铁三角”

车规级质量管理建立在三大核心标准构成的“铁三角”之上：

AEC-Q100 (可靠性)：由汽车电子委员会制定，是芯片级应力测试认证标准。其通过高温工作寿命 HTOL、温度循环 TC 等一系列严苛的环境加速试验，模拟芯片在车辆 15 年或 20 万公里使用寿命内可能遭遇的极端条件，验证其固有可靠性，目标是将失效率 (FIT) 控制在极低水平。

IATF 16949 (过程稳健性)：汽车行业通用质量管理体系标准，强调通过过程方法预防缺陷。其精髓在于强制要求组织有效应用五大核心工具 (APQP、PPAP、FMEA、SPC、MSA)，确保制造过程能力充足并处于受控状态。

ISO 26262 (功能安全)：该标准针对汽车电子电气系统，规定了一套功能安全开发流程。要求采用危害分析和风险评估 (HARA) 等系统性方法识别潜在风险，并通过技术措施将风险降低至可接受的汽车安全完整性等级 (ASIL)。

三者关系密切：稳健的制造过程 (IATF 16949) 是生产可靠产品 (AEC-Q100) 的基础，而可靠的产品则是实现功能安全 (ISO 26262) 的前提。

2.2 “零缺陷”理念的深层解读

“零缺陷”理念由质量管理大师菲利普·克劳士比提出，其核心是一种追求卓越的工作标准与管理哲学，而非绝对的

完美无缺。在车规半导体领域，其内涵可解构为以下四点：

导向是“预防”：将质量管理重心从“事后检验”彻底转向“事前预防”，通过在设计与工艺开发阶段投入资源，从根本上消除失效风险。

标准是“符合要求”：必须清晰、准确地定义所有客户要求，并将“百分之百符合要求”作为唯一的工作准则。

方法是“第一次做对”：确保所有过程 (设计、制造、测试) 具备足够能力，力求一次性输出合格结果，避免返工、报废等代价。

工具是“PONC”：运用“不符合要求的代价”这一财务工具量化质量损失，使改进价值可视化，以赢得管理层支持。

3 体系构建：一个四层级整合模型

基于上述理解，本文提出一个由四个相互关联、层层支撑的层级构成的车规级质量管理体系模型，如图 1 所示。

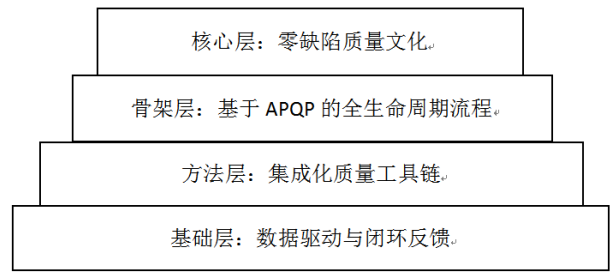


图 1 车规级半导体质量管理体系四层级模型

3.1 核心层：零缺陷质量文化的塑造

文化是体系的“灵魂”，决定其能否真正落地。塑造“零缺陷”文化需要：

1) 高层领导力驱动：最高管理者应成为“零缺陷”理念的首席布道者和践行者，通过决策与行动传递“质量优先”的明确信号。

2) 全员赋能与参与：通过持续培训使员工理解“零缺陷”的意义，掌握实现技能，并授予其在发现异常时“停止生产”的权力。

3) 激励机制重构：奖励通过预防措施避免问题的行为，而非仅嘉奖“救火”英雄，从制度上引导事前预防。

3.2 骨架层：基于 APQP 的全生命周期流程

以产品质量先期策划 (APQP) 为框架，将质量管理活动系统嵌入产品从概念到量产的全过程。

1) 策划与定义：收集分析客户需求 (VOC)，转化为具体可测量的内部质量目标。

2) 产品设计与开发：开展设计失效模式与影响分析 (DFMEA)，结合 FTA 进行系统故障推理，确保设计方案鲁棒性。

3) 过程设计与开发：开展过程失效模式与影响分析 (PFMEA)，设计满足产品要求的制造与测试流程，输出

控制计划 (Control Plan)。

4) 过程验证与确认: 通过试生产验证过程能力 (CPK \geq 1.67), 完成生产件批准 (PPAP)。

5) 反馈、评定与纠正措施: 量产后持续监控, 运用 8D 等结构化方法解决问题, 反馈经验教训至知识库。

3.3 方法层: 集成化质量工具链的协同

工具是执行流程的关键, 需打破其壁垒以形成合力:

1) FTA 与 DFMEA 联动: 运用 FTA 识别系统级故障模式, 为 DFMEA 提供关键输入, 提升失效分析的系统性。

2) DFMEA 向 PFMEA 传递: 将 DFMEA 识别的失效效应与关键特性传递至 PFMEA, 确保制造过程能有效控制设计风险。

3) PFMEA 到控制计划落地: 将 PFMEA 成果体现在控制计划中, 明确各工序的控制方法、频率及反应计划。

4) SPC 与防错 (Poka-Yoke) 技术应用: 对关键参数实施 SPC 监控, 并优先采用防错装置, 从源头防止失误。

3.4 基础层: 数据驱动与闭环反馈

构建统一的质量数据平台, 实现全流程数据集成与智能分析。

1) 数据集成: 整合 SPC、MES、测试、客户端等多源数据。

2) 数据分析与洞察: 利用统计过程控制和数据挖掘技术, 实时监控过程稳定性, 预测潜在失效趋势。

3) 知识闭环: 确保从市场投诉、内部失效到根本原因分析、纠正预防措施、及有效性验证的全过程信息形成闭环, 并将有效措施标准化, 更新至 FMEA 库、控制计划等文件中, 驱动组织持续改进。

4 实践案例: 新能源汽车主驱 IGBT 模块的 NPI 质量管理

4.1 项目背景

某半导体公司为国内一主流新能源汽车制造商开发一款 1200V/600A 的 IGBT 功率模块, 用于主驱动逆变器。客户明确要求: 产品在整车生命周期内失效率 (FIT) 低于 5, 量产交付缺陷率 (PPM) 小于 20。

4.2 质量管理体系在 NPI 中的具体实施

1. 策划与定义阶段:

成立跨部门 APQP 核心团队, 成员涵盖研发设计、工艺、质量、制造、采购、物料技术。将客户要求逐项分解为内部可执行、可测量的技术指标, 如“芯片焊接空洞率 $<$ 2.5%”、“键合强度 CPK \geq 1.67”等。

2. 产品设计与开发阶段:

开展 FTA: 针对“逆变器输出失效”向下逐层分析, 识别出“IGBT 模块开路/短路”为中间事件, 进一步分解至“键合线脱落”、“芯片焊接层疲劳”、“栅极击穿”等基本事件。

进行 DFMEA: 基于 FTA 指引, 团队重点分析导致“键合线脱落”的潜在设计原因, 如芯片焊盘金属层设计不合理、

键合线材选择不当等。据此优化焊盘结构, 并选择与芯片 CTE (热膨胀系数) 更匹配的高可靠性键合线。

组织设计评审: 邀请公司专家及 FEMA 工程师, 对设计方案和 DFMEA 报告进行多轮评审, 确保设计风险被充分识别并规避。

3. 过程设计与开发阶段:

进行 PFMEA: 以 DFMEA 输出为输入, 对“真空回流焊”和“超声键合”等关键工序进行深入分析。例如, 针对“芯片焊接空洞率超标”的失效模式, PFMEA 团队识别出“焊膏印刷厚度不均”、“回流焊炉温区曲线设置不当”等根本原因, 并制定了“引入焊膏厚度自动检测仪”、“建立炉温曲线每日校验制度”等预防与探测措施。

制定控制计划: 将 PFMEA 的成果具体化。控制计划明确规定了焊接空洞率、键合强度等关键特性的监控方法、抽样频率、测量工具以及超出控制限时的紧急反应流程。

4. 过程验证与确认阶段:

MSA 先行: 进行测量系统分析 (MSA), 确保拉力测试机的 %GR&R 小于 10%, 保证键合强度数据的可靠性。

初始过程能力研究: 首批 200 个模块的键合强度 CPK 值为 1.52, 未达 1.67 目标。

持续改进: APQP 团队运用实验设计 (DOE) 方法, 对键合工艺的参数 (压力、功率、时间) 进行优化。经过通过两轮迭代确定最佳参数窗口。再次试产后 CPK 值显著提升至 1.85。

PPAP 批准: 将完整的设计、过程与质量验证文件包及生产样件提交客户, 最终获得无条件 PPAP 批准。

4.3 实践成效评估

该 IGBT 模块投入量产至今已超 36 个月, 其质量绩效数据如下:

1) 内部过程质量: 关键工艺参数 CPK 均稳定在 1.8 以上, 月度统计 PPM 低于 20。

2) 客户端表现: 累计交付超百万只模块, 客户端 PPM 20 以下。

3) 可靠性表现: 实际计算失效率 (FIT) 低于 5, 满足客户要求。

4) 商业价值: 由于前期充分的预防措施, 避免了可能因设计变更或批量返工导致的巨大损失, 赢得了客户高度信任, 为后续项目合作奠定了坚实基础。

5 挑战与对策

在体系推行过程中, 企业面临以下主要挑战及应对策略:

挑战 1: 跨部门协作壁垒。对策: 由最高管理者牵头将跨部门协作成效纳入部门及个人 KPI, 并建立定期跨部门质量评审机制。

挑战 2: NPI 周期紧张, 前期投入压力大。对策: 通过

数据分析,展示前期质量投入在减少售后索赔、降低产线停机 and 报废率方面的长期回报,凸显质量成本优势。

挑战 3: 缺乏精通工具和流程的复合型人才。对策:建立内部质量专家培养和认证体系,设立“FMEA 专家”、“SPC 大师”等技术晋升通道,鼓励跨岗位实践。

挑战 4: 信息系统孤岛,数据无法共享。对策:推动企业级数据中台建设,制定统一的数据接口标准,逐步打通设计、生产、质量、供应链等系统。

6 结论与展望

本文构建了以“零缺陷”文化为核心,APQP 流程为骨架,集成化工具链为方法,数据闭环为基础的车规级半导体质量管理体系。其核心价值在于将碎片化的质量活动系统化,从事后应对转向事前预防。通过对一个 IGBT 模块 NPI 过程的剖析,实证了该体系在提升过程能力、降低缺陷率、确保产品可靠性方面的显著成效。

展望未来,车规级质量管理将呈现三大趋势:一是与功能安全深度融合:质量管理体系与 ISO 26262 功能安全流程的整合将更加紧密,对系统性失效的预防将成为新的重点。二是发展智能质量 (Quality 4.0): 利用工业物联网 (IIoT)、大数据和 AI,实现实时监控、预测性质量预警和自适应工艺调整,迈向“智慧零缺陷”。三是供应链质量

协同:构建覆盖上下游的供应链质量生态圈,实现全价值链质量透明与共治。

参考文献

- [1] Crosby, P. B. (1979). *Quality is Free: The Art of Making Quality Certain*. New York: McGraw-Hill.
- [2] Automotive Electronics Council. (2014). *AEC-Q100-Rev-H: Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Integrated Circuits*.
- [3] International Automotive Task Force (IATF). (2016). IATF 16949:2016 Quality Management System for Automotive Production.
- [4] International Organization for Standardization. (2018). *ISO26262-1:2018 Road vehicles—Functional safety*.
- [5] 张建国,王磊. (2022).面向零缺陷的车规级芯片测试策略研究.电子测量与仪器学报, 36(5),1-8.
- [6] Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution* (2nd ed.). Milwaukee: ASQ Quality Press.
- [7] 孙志刚,李静. (2021).基于APQP的汽车功率半导体模块开发质量管理实践.半导体技术, 46(2), 141-148.
- [8] Yang, K. (2007). *Voice of the Customer: Capture and Analysis*. In: *Design for Six Sigma*. New York: McGraw-Hill.