

芯片验证漫游指南

A Walking Guide to SoC Verification

从系统理论到UVM的验证全视界

The Panorama of Verification from System to UVM

刘 斌 / 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内容简介

本书以芯片验证工程师的视角，从系统理论到UVM的验证全视界，全面介绍了芯片验证的理论和实践。本书共分10章，第1章介绍芯片验证的概述，第2章介绍系统理论，第3章介绍UVM的验证全视界，第4章介绍UVM的验证全视界，第5章介绍UVM的验证全视界，第6章介绍UVM的验证全视界，第7章介绍UVM的验证全视界，第8章介绍UVM的验证全视界，第9章介绍UVM的验证全视界，第10章介绍UVM的验证全视界。本书可作为芯片验证工程师的参考书，也可作为芯片验证工程师的培训教材。

芯片验证漫游指南

——从系统理论到UVM的验证全视界

刘斌 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

资深验证专家刘斌（路桑）向您全面介绍芯片验证，从验证的理论，到 SystemVerilog 语言和 UVM 验证方法学，再到高级验证项目话题。这本综合性、实用性很强的验证理论和编程方面的图书，针对芯片验证领域不同级别的验证工程师，给出了由浅入深的技术指南：学习验证理论认识验证流程和标准，学习 SystemVerilog 语言和 UVM 验证方法学来掌握目前主流的动态验证技术，了解高级验证话题以在今后遇到相关问题时参考。

本书适用于高校集成电路相关专业学生使用，可以作为芯片验证课程的教材，也适用于验证人员提高自身能力学习之用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

芯片验证漫游指南：从系统理论到 UVM 的验证全视界/刘斌著. —北京：电子工业出版社，2018.4

ISBN 978-7-121-33901-1

I. ①芯… II. ①刘… III. ①芯片—验证—指南 IV. ①TN43-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 056175 号

策划编辑：窦 昊

责任编辑：窦 昊

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1092 1/16 印张：35 字数：896 千字

版 次：2018 年 4 月第 1 版

印 次：2018 年 4 月第 1 次印刷

定 价：99.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010) 88254466, douhao@phei.com.cn。

序（一）

献给我的爱人石倩

和我的两个女儿大蒙小蒙

是你们的陪伴

让我心生柔软

近年来，我国集成电路（IC）产业高速蓬勃发展，与发达国家的技术差距不断缩小，国家集成电路产业基金也起到了积极的催化作用。产业基金的第二期将重点投资在集成电路设计领域，预计规模将接近2000亿元。随着5G通信、物联网、人工智能、自动驾驶、新能源汽车、智能家居等需求快速增长，IC技术门槛更高，能够实现进口替代的高性能集成电路芯片。

在这一时代背景下，我国集成电路产业面临人才短缺和结构失衡挑战。竞争日益激烈的市场，在大量新企业涌入的背景下，复合型人才的渴求非常迫切，形成了巨大的人才需求缺口。需求迫切主要表现在两个方面，一方面高校每年毕业的IC设计人才未能满足数量需求，另一方面，毕业生的专业IC技能与企业的实际需求仍存在一定差距。因此，为了加速推动我国复合型IC工程人才的培养，作为人才培养主力军的高校和集成电路企业之间就需要进行紧密共享与深度合作平台，共同推动我国IC人才培养质量的提升。

作为集成电路行业，中国集成电路设计大学微电子学院通过与企业紧密合作开展了一系列的创新创业，积累了丰富经验。在合作机制、课程体系、教学方法等方面形成了鲜明的特色。为IC行业人才培养探索了新的路径。2015年，微电子学院与本书作者及其所在的集成电路企业签订了战略合作协议，双方共同开发IC设计人才培养方案，邀请作者到我院进行IC设计课程的教学与经验分享课程，并在课程结束后优先学生到英特尔和其他众多国内顶级IC企业参加实习，最后撰写实践报告完成了论文。可以说，校企合作实践探索了IC教学体系，搭建起良好的产学研用合作平台，使用我院学生的知识体系和实践能力与实践能力得到了显著提升，大大提升了我国人才培养进行上述实践探索经验，校企与英特尔公司建立的产学研合作基地被评为2017年度全国产学研合作示范基地。

在与作者交流时，得知作者计划将此书作为IC验证工程教材，我感同身受支持，我作为作者之一，也通过多年积累经验将最新的芯片验证流程推广至中国大学课程（MICAC）在线教育平台，将合作成果形成教材或课程成果与全国其他高校分享，共同推动我国IC专业人才培养质量的提升果能持续改革创新。

作者一直工作在一线研发第一线，是国际IC行业领导者英特尔公司的高级验证专家，具有丰富的工作经验，在验证IC验证人才所需的知识与能力要求。同时，作者在我校东南大学微电子学院芯片验证课程多年，对验证理论有深刻的理解。因此，我相信本书将会成为集成电路验证领域可信赖的高质量参考的不朽著作。作者能够坚持多年在一线研发芯片

序（一）

近年来，我国集成电路（IC）产业高速蓬勃发展，与发达国家的技术差距不断缩小。国家集成电路产业基金起到了积极的推动作用。产业基金的第二期将重点投资在集成电路设计领域，预计规模有望达 2000 亿元。设计领域的投入，将会围绕人工智能、物联网、5G 通信、智能汽车、智能电网等国家战略和新兴行业，创造出科技含量更高、能够实现进口替代的高端集成电路芯片。

在这一时代背景下，我国集成电路企业正呈现出数量和规模迅速增长、竞争日趋激烈的态势。在大量资本投入的背景下，企业对 IC 设计工程型专业人才的需求非常迫切，形成了巨大的人才需求缺口。需求差距表现在两个方面，一方面高校每年毕业的 IC 设计人才无法满足数量需求。另一方面，毕业生的专业 IC 技能与企业的实际需求也存在一定欠缺。因此，为了全面推动创新型复合 IC 工程人才的培养，作为人才培养主力军的高校和集成电路企业之间就需要进行资源共享与深度产学研合作，共同推动我国 IC 人才培养质量的提升。

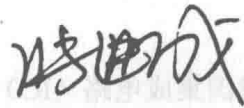
在产学研合作方面，十多年来西安电子科技大学微电子学院通过与英特尔等行业骨干企业的密切合作，积累了丰富的经验，在合作机制、课程体系、教学方法等方面形成了鲜明的特色，为 IC 创新人才培养奠定了坚实的基础。2015 年，微电子学院与本书作者及其所在的英特尔公司携手开展 IC 教学内容改革与协同育人的产学研合作项目，邀请作者到我院客座讲授集成电路芯片验证课程，并在课程结束后优选学生到英特尔和其他众多国内高端 IC 公司参加实习，进行项目实践并完成工程论文。可以说，将企业实践经验引入教学体系，搭建起良好的产学研协同育人平台，使得我院学生在知识体系和实践能力方面获得了显著提升，大大提升了我院人才培养的行业适应度和满意度。我院与英特尔公司建立的研究生培养基地被评为 2017 年度全国专业学位研究生培养示范基地。

在与作者交流时，得知作者计划将此书作为 IC 验证工程类教材，我感到非常高兴。我校已经和作者达成一致，将这三年以来逐渐打磨完善的芯片验证课程推广至中国大学慕课（MOOC）在线教育平台，将合作多年形成的优秀工程实践课程成果与全国其他高校分享，共同推进我国 IC 专业人才培养质量的提升和教学模式改革创新。

作者一直工作在企业研发的一线，是国际 IC 行业领导者英特尔公司的资深验证专家，具有丰富的工程经验，深知目前 IC 验证人才所需的知识与能力要求。同时，作者在我校和西安交通大学客座讲授芯片验证课程多年，对验证理论有很深的理解。因此，我相信本书将会成为集成电路验证理论与实践高度融合的不可多得的著作。作者能够坚持多年在我校开展芯片

验证工程教学，在校企合作培养集成电路工程型人才中起到带头示范作用，在此我对作者长期致力于产学结合推动高校教育事业的奉献精神表示由衷的感谢与敬意。

在本书出版前夕，我应邀为本书作序，感到非常荣幸。希望本书能为我国集成电路行业的创新型工程人才培养发挥重要的促进作用；希望作者进一步将本书和芯片验证课程向全国推广，为中国集成电路人才培养贡献更大的力量。



张进成

教育部长江学者特聘教授
西安电子科技大学微电子学院副院长

序（二）

数字集成系统的验证，是提高设计芯片一次流片成功的关键。验证工作与设计仿真工作不同，仿真的目的是证明设计方案的正确性，用仿真的方法证明设计方案符合拟定的设计规范；验证工作则是证明设计方案中不存在错误。理想情况下，存在任何设计错误的方案都不应该进入流片，换句话说，进入流片环节的设计方案中不应该存在已知错误。验证过程的目标就是找出设计方案中可能存在的错误。

设计错误很容易造成芯片完全不能工作，而修正错误重新流片不但需要投入额外的费用，更会大大推迟将芯片上市时间，这些风险对于芯片产品的开发来说都是不可接受的。随着芯片制造工艺的更加精细，芯片制造费用的不断增加，芯片功能越来越复杂，验证的重要性也日益增加。

本书作者 2010 年在瑞典皇家理工学院毕业后，一直从事芯片验证工作，本书是其多年实际工作经验的结晶。全书的内容涉及验证方法及流程设计，也涉及常用数字单元的验证经验。相信本书的内容有益于高等学校数字集成系统设计的高年级学生和研究生学习，有益于集成电路领域从事数字系统设计的工程师的工作，更有益于直接从事集成电路验证工作的工程技术人员的工作。

中国集成电路产业的发展，正在进入新的高速发展阶段。相信本书的出版定会给集成电路设计行业带来新的知识、成熟的经验，为行业的发展带来新的动力。

王志华

清华大学教授，IEEE Fellow

2018 年 3 月于清华园

前言

在我有限的工作生涯中值得我庆幸的是，刚进入工作岗位时的第一任老板给了我选择的权利——设计岗还是验证岗？因为当时我已经在海外学习了芯片验证的相关知识，也了解了验证的相关事务，于是便选择了验证岗并一直从事到现在。与国内多数验证工程师的入职经历不同的是，我当时是有更多选择的，而选择验证岗，并不是被公司指派到了验证岗。这中间的差别在于，一家认可验证工程师贡献的公司是将验证岗位与其他岗位同等看待的，甚至由于依赖验证质量而会给予验证更多的褒奖。从这两年芯片设计行业的招聘数据来看，验证工程师与设计工程师的薪资是看齐的。尽管验证工程师的春天已经到来，不过我们还需要在芯片设计产业链上制定自己的从业标准，提高验证工程师的从业形象，继而才能摆脱多年以来设计为主，验证为辅的陈旧思想。

参考清华大学魏少军教授在 2017 年 SEMICON 大会上的讲稿内容，我国在 2020 年的芯片设计从业人数需求将从现有的 13 万人急速增长到 28 万人，而全国高校每年培养的各类集成电路人才还不到 1 万人。这中间的人才数量差距对于高校人才培养和企业用人单位都已是严峻的问题。在这么大的人才资源挑战面前，2015 年国家教育部发布了关于支持有关高校建设示范性微电子学院的通知，其中包括 9 所高校建设示范性微电子学院，17 所高校筹备建设示范性微电子学院。在提高教学质量、扩充从业人才的同时，该通知要求加快培养集成电路产业急需的工程型人才，建立学院新型用人机制，鼓励教师潜心育人并主动开展产学合作，聘请一定比例的企业专家授课或担任指导教师，引进国外高水平专家，建立一支由专职教师、企业专家和兼职教师组成的师资队伍，推动示范性微电子学院国际化发展。

同样也是在 2015 年春季，我应西安交通大学微电子学院梁峰教授的邀请，为集成电路专业的硕士研究生开设了“SoC 系统验证”英文课程。同年，应西安电子科技大学微电子学院史江义教授的邀请，为集成电路专业的硕士研究生开设了“SystemVerilog 芯片验证”课程，到现在已然度过三个春秋。随着课程内容体系的不断打磨完善，以及每学期上百人的课程反馈，院方和学生都一致认为应该将这门课推广到全国。因此在本书出版的同时，我也在积极同西安电子科技大学微电子学院对接，希望通过结合验证课程和本书的出版，在不久的将来通过中国大学 MOOC（慕课）网可以让更多集成电路相关专业的学生了解验证的知识，扩大产学结合的影响。让更多在校学生能够接触主流的芯片验证知识，同时也使得芯片设计企业可以获得具备相关技能的人才，达到校企双赢的目的。

响应国家集成电路产业战略是 IC 从业者的幸事。在与高校展开校企合作的不久，我于 2016 年春季开始计划将验证课程做成精品课程，从高校教育出发来影响芯片行业对验证岗位的认识，并且为企业输送合格的工程类人才。为了配合这一计划，我创办了“路科验证”的

技术订阅号。我创办这个订阅号的初衷一方面是为了督促自己能够定期地输出文章，另外一方面也是可以从验证技术文章中早一点获得读者的反馈来修正本书内容。在 2017 年夏季，本书的所有内容完成，有赖于张国强先生的引荐，我得以与电子工业出版社签订著作出版合同。不过与计划有点出入的是，此书原本是计划在 2017 年秋季面市的，这可以为我的学生们提供配套的验证课程教材，也是为了给我的女儿大蒙庆祝生日。结果由于企业项目的压力和对出版过程的乐观估计，一直将此书延迟到了 2018 年的春季，以至于我的二女儿小蒙已然半岁了。

路科验证订阅号在 2017 年秋季校招期间发布了一篇文章——《面对这份 2017 年的 IC 应届薪资表，我真想再毕业一次！》，引起了验证从业人员的广泛评论和转载。这篇文章也让即将从事验证的大学生们认识到国内 IC 行业的朝阳形势。我相信，只有正确引导大学生对验证的认识，才可能在未来让这些从事 IC 行业的精英们将验证的重要性铭记在心，而不论他们将来进入设计岗位、验证岗位又或者是项目管理等其他岗位。

面对日益复杂的芯片系统设计和 IP 的高度集成方式，验证的重要性日益突出。验证工程师们不再仅仅掌握某一种工具或者某一种语言就可以确保芯片的功能正确。他们需要掌握多种工具和多种语言，并且在项目环节中需要选择合适的工具和方法才有可能满足紧张的项目节点和复杂的设计功能要求。同时，功能正确也不再是芯片的唯一指标，在移动化时代，芯片的低功耗和高性能两大要求也被摆在同样重要的地位。可以说，验证工程师即使掌握了十八般武艺，还需要将它们灵活应用，最终才能做好芯片的“守护人”，为高成本流片扫清障碍，降低流片的风险。

验证工程师的经验提高得比较快，这与他们从事于近似软件代码编写的工作性质有关。验证工程师可以通过快速训练、试错并且再纠正来提升经验。基于这一背景，近些年验证方法学一直借鉴软件开发的手段，不断地在提升验证效率。这也意味着在接下来的时间，验证行业将因为与芯片设计复杂度不断加大的效率代沟而需要不断推出新的工具、语言和方法学来提升其效率。验证岗位的知识“半衰期”要比同行业的其他岗位更短，验证工程师因此需要保持不断学习的心态来武装自己。同时对于高校毕业生，验证岗位的招聘要求也将不断提高。可以预见到是，将来的芯片设计行业需求矛盾在于，需要数量巨大的验证工程师来为芯片质量保驾护航，但日益提高的岗位技能要求又使得高校无法很好地培养验证人才。相比于设计工程师，验证工程师是更趋近于工程型的人才，因此如何能够促进校企合作、深入产学结合就成为了解决校企之间人才技能需求不对等的根本手段。

在过去的十年中，验证方法学经历了一轮主要的变化。在这期间，SystemVerilog 成为主要的验证语言，UVM 也经过各种动态验证方法学的融合成为主流验证方法学。同时，形式验证方法学也依然有着它的优势和用武之地，模拟（emulation）手段逐渐重回主流，成为与仿真（simulation）并重的芯片验证手段。可以这样说，如果要涵盖目前所有主流的验证技术，恐怕这本书还再需要一年的时间来充实其内容。可是时间不等人，我也希望本书能够早日出版。虽然有一些内容上的缺憾，但本书针对主流验证技术的入门和实用宗旨还是贯穿了下来。本书结合轻量级的仿真学习环境和动态仿真技术，尽可能地使准备入门或者具有初、中级经验的读者都能够得到成长。本书的目的不单单在于验证技术的掌握，还希望将验证世界的全

貌以及目前所面临的主要问题一并带给读者。验证技术的不断衍变发展，预示着本书的部分内容将在未来需要逐步更新，而我也希望在下一版中将验证世界新的技术手段和首版未尽的部分添加进去。

本书从结构上分为四个部分，在校学生或者验证从业者可以根据自己的需要选择阅读，它们分别是：

- 验证的通识部分（第 1 章至第 6 章）。具备不同经验的读者都可以从中获取验证世界的全貌。第 1 章是对芯片验证的总览；第 2 章从各个维度来介绍验证的策略；第 3 章描述目前所有的验证方法；第 4 章则从验证计划入手介绍如何量化验证；第 5 章从验证管理的角度来论述其各个要素；而第 6 章则作为进入下一部分（SystemVerilog 语言）的准备来介绍验证环境的结构和组件。
- SystemVerilog 语言部分（第 7 章至第 9 章）。该部分不同于以往的语言类学习书籍，它的重点不在于提供完整的语法要点，而是结合贯穿于本书的设计 MCDF 来展开实践，带领读者思考如何利用 SV 的主要特性去构建一个完整的验证环境。因此，该部分是从验证环境基础要素学习（第 7 章）到基本组件的实现（第 8 章），再到最后的环境集成（第 9 章）。这一部分对于缺少 SV 语言基础的读者会有帮助，同时建议参考对照 SV 语言的标准手册一同学习。对于具备 SV 经验的读者，阅读这一部分也会帮助其梳理以往容易出错的知识点。
- UVM 验证方法学部分（第 10 章至第 14 章）。通过 SV 语言部分的学习，读者可以利用 MCDF 的 SV 轻量级环境来理解验证环境的共性，包括环境的组织、构建、通信和运行。当进入到 UVM 部分时，建议读者逐章阅读，以此达到循序渐进的效果。第 10 章带领读者游览 UVM 世界，了解其重要的各个特性；第 11 章则仿照 SV 的学习步骤，给读者介绍 UVM 的各个组件和环境构成；第 12 章是 UVM 的 TLM 通信部分；第 13 章是 UVM 的运行部分，即介绍序列的各种用法；第 14 章是平行于 UVM 结构的部分但又不可或缺，即寄存器模型部分。从 SV 部分过渡到 UVM 部分的读者会在这部分的各章节中有似曾相识的感觉，因为 UVM 的主要特性和结构已经在 SV 部分中有类似的实现，这种连续性有助于将 SV 与 UVM 进行特性对比和学习。
- 高级应用部分（第 15 章至第 18 章）。该部分结合了实际项目和验证潮流，对中高级验证工程师有启示作用。我也希望读者可以从这些部分了解到，语言和方法学是验证的技能基础，但要解决项目的实际需求、提高整体的验证效率和一致性、实现跨平台、跨研发部分的验证平台，还需要做出更多的定制化解决方案。而对于目前还没有令人满意的解决方案的验证难题，我们还需要时间去构想推动新的验证方法和工具。第 15 章给出了如何实现验证平台自动化和测试标准化的方案，适用于大中型公司的验证效率提升；第 16 章着眼于目前在标准制定过程中的便携激励标准，介绍了已有的便携激励工具和跨平台的验证结构；第 17 章针对 SV 与 UVM 同其他语言的接口给予实践指导；第 18 章则将一些分散的高级话题给出行业的解决方案。读者可以将这一部分作为工作的指导手册，在将来遇到相关问题时参考。

尽管试图给出动态验证的全貌，但我也不得不遗憾地指出，几个重要内容暂未在本书首版中囊括，包括：从验证计划到功能覆盖率的量化手段和标准，功能覆盖率驱动的智能化收敛验证，断言的应用场景和复用实践，验证 IP 的开发模式和推广等，未尽的地方只能寄希望于在下一版中补缺，而在那时，验证世界风起云涌，又将出现什么新的技术还未尽可知，且让我们拭目以待吧。

对于本书的出版，需要感谢的人很多，他们包括但不限于我的家人，督促我出版的人以及帮助我出版的人。谢谢我的妻子支持我在周末外出写作而不认为那是逃避带孩子的行为；谢谢我的女儿们大蒙和小蒙，在我创作力缺乏的时候，你俩就是我快乐的源泉；谢谢我的父亲在获知我打算写书的时候收回了我从小不会写作文的工科生看法。那些我告知要写书出版的同事朋友们都是督促我出版的人，在这里感谢王凛、樊狄、王昊、安晓辉、马凤翔、刘昭，你们在我写书的前后都给了我力量，让我能够将自己的想法坚持下来并最终得以实现。帮助我出版的人也在不同的方面给予我支持，在这里感谢邵海波、乔金浩、任文强、王东瑞、王卫凯、石轩、蒋心祝、郭宇、张石，是你们帮我进行资源对接，也让我能够从紧张的项目中抽身出来日复一日地写作。还有很多的人需要致谢，尽管名字没有一一列出，但我心存感激。此外，还需要感谢给予我安静环境的婕妮花咖啡馆和言几又书店，还有在夜深人静时陪我写作的威士忌。

本书中的全部源代码，读者可以从路科验证订阅号（微信公众号搜索“路科验证”，或者扫描本书的路科验证二维码），或者从我的个人网站 www.rockeric.com 下载。读者可以通过邮箱 rockeric@vip.163.com 与我联系，或者在路科验证订阅号后台留言。我在客座讲授验证的时候就告诉每一位学生，语言和方法学的核心不在于语法和细碎的知识点，而在于实践和全局的认识。结合本书内容，读者也可以从订阅号和个人网站下载我讲授的验证课程课件和配套实验材料。另外，我也会不定期地举办路科验证的线下与线上验证培训，帮助那些有意进入验证领域、精进验证技能的在校学生和工程师一同领略验证世界的新奇壮丽。

著 者

2018 年 3 月 3 日于西安

行业人士评语

自 2015 年起,本书作者刘斌先生受西安交通大学微电子学院的邀请,与我院梁峰副教授共同开设“SoC 验证”研究生课程,该课程把工业界最新的 SoC 验证方法和工具引入到高校课堂中,讲授了从传统教科书上学不到的业界先进的 SoC 验证流程和方法。该课程对我院研究生在集成电路 SoC 验证方面的系统性及创新性上的培养贡献很大。现在刘斌先生把他在 SoC 验证方法上的长期实际工作和教学经验整理成书,是一本集理论和实际应用为一体的实用性很强的教材。相信这本书能够帮助高校培养人才,满足工业界的人才需求,也使得学生能够更快、更好地学以致用。

耿莉 西安交通大学微电子学院 副院长、教授/博导

2014 年,西安交通大学微电子学院准备为研究生建设一门新的关于 SoC 验证的课程,我当时了解到刘斌在为 Intel 公司内部做 SoC 验证的培训,遂向刘斌发出邀请,共同建设该门课程,把业界领先公司的集成电路验证方法引入到高校课堂。通过该课程的建设,我院的研究生第一次领略到了先进的验证思想和方法,受益匪浅。现在刘斌将多年实践和教学经验整理成书。刘斌在 Intel 公司的工作经历和团队管理经验为这本书注入了不同于传统教材的特色,无论在校学生还是已经入职的工程师都会从这本书中获益。希望本书的发行能为中国培养出更多优秀的验证工程师,适应国家对集成电路产业人才的迫切需求。

梁峰 西安交通大学微电子学院 副教授/博导

这本书为从事集成电路验证的工程师们提供了由浅入深、从概念到实例的详细介绍,总结了作者长期验证工作的项目经验,能够帮助读者快速入门,继而掌握复杂系统的验证平台搭建。即使从业多年如我者,阅读本书时依旧感佩于作者对验证方法的深入理解和深厚功底。本书必将成为芯片功能验证领域的一部经典之作。

史江一 西安电子科技大学微电子学院 副教授

这是一本非常适合集成电路相关专业学生以及验证从业人员认真阅读的好书。本书内容充实、结构完整、条理清晰,书中详细地介绍了验证所需要掌握的理论知识,还从实际应用的角度向读者展示了验证的方法,并将作者在工作中多年积累的经验总结传授给读者。本书能够帮助初学者快速入门,并能够使具有一定基础的学习者在能力上有大幅度的提升。在书中,读者不仅能够学习到验证的相关知识,还能感受到作者对验证工作的热情与投入,相信

这种精神会对读者的学习与生活起到积极的作用。各位读者读过此书后一定会受益匪浅。

常玉春 大连理工大学微电子学院 教授/博导

随着超大规模集成电路功能的日趋丰富，尤其在当前的热点方向诸如 5G、AI、工业 4.0 等，更多性能，更快速度，更低功耗成为芯片设计制造商的追求目标。在整个芯片的设计制造链路上，硅前（pre-silicon）验证的重要性，从成本和产品化的意义上来说，已越来越引起芯片设计者的重视。本书就是从这个角度出发，涵盖了全面的芯片设计验证，尤其是硅前验证的各个阶段，各个方面的内容，是一部内容丰富、结构紧凑、着眼大局又关注细节的指南，无论是初学者还是有一定经验的从业者，都可以从中获益。我有幸和作者共事多年，从他身上看到了一位执着于芯片设计验证的工程师的可贵品质，那就是认真细致、责任心强、追求完美。他在英特尔高强度的工作节奏下，依然利用大量自有时间，总结很多实际项目执行的经验和教训，体现在了这本指南中，希望对读者有所帮助。在此我也预祝作者在这个领域有更进一步的发展和成功。

王凇 英特尔（Intel）西安 设计总监

本书详细描写了验证相关的主要技术，内容翔实、新颖、全面。尤其是后半部分，汇集了作者多年来从事项目开发的经验，可供集成电路的验证人员、老师和学生阅读，是一本优秀的指导书籍。

邵海波 英特尔（Intel）西安 高级验证经理

集成电路是电子产业的基础，是信息时代的基础，甚至可以说是现代文明社会的基础。这个产业正从欧美日韩转移到中国来，而且由于中国电子整机的逐渐强大、各种资本的重视，以及政府的高度支持（列为实体经济第一位），集成电路产业在中国将迎来十年以上的高速增长。这样一个巨大的朝阳行业，需要更多的优秀芯片人才加入。芯片人才的成长，只靠高校的师资与教材根本不够，还需要产业里有丰富实战经验的技术高手愿意分享自己的积累与智慧。很高兴看到本书作者刘斌先生把自己多年的芯片验证实践总结分享出来，供学生们学习。老胡也期待产业中更多经验丰富的技术专家写出更多好书或到高校兼职任教，为加快中国芯片人才的培养做出更大的贡献！感谢你们！

胡运旺 IC 咖啡

随着先进工艺节点不断演进，芯片系统设计日趋复杂，验证环节在芯片设计流程中的重要性不断提高；然而，芯片验证领域的专业人才相对短缺，亟需产业界和学术界的专家共同努力，从源头上解决人才问题。这本书的独到之处在于，著者在验证技术领域深耕多年，因

此能够以产品和工业级的视角来提炼验证技术全貌，既注重理论体系又强调实战经验。希望本书能给予读者启发，帮助培养出更多优秀的验证人才。

张竞扬 摩尔精英 创始人兼 CEO

这本书写出了很多我想写却一直没时间写的东西。在很多人的眼里，验证是很简单的事情。本书中，作者从浅到深，把验证的难度逐一呈现给大家，在此基础上又从深到浅，把验证的难度逐一分解。它让读者对验证的理解实现了从易到难，又从难到易的跨越！读完此书，验证再无难事。

张强 《UVM 实战》作者

作者刘斌是 EETOP 知名博主（博客地址：<http://www.eetop.cn/blog/?rockeric>），常年在 EETOP 分享众多高质量的验证相关博文，让我以及广大 EETOP 网友受益匪浅！与国内多数 IC 验证工程师的入职经历不同的是，作者当年是主动选择了验证岗，并不是被公司指派去做的验证。因此他对芯片验证有着浓厚的兴趣，在该领域深耕多年，总结出了不少宝贵的项目实践经验！作者文笔诙谐幽默，富有文艺范，同时这本专著覆盖芯片验证的方方面面，包含了很多前沿验证技术。我相信验证工程师们也能够从书中获得对验证的更大兴趣，更快地提升验证技能。

毕杰（jackzhang） EETOP 创始人

随着芯片设计复杂度的提高，验证的比重在芯片设计中占得越来越大。加上最近几年政府加大了芯片行业的投入，目前行业面临着验证人才紧缺的问题。这是一本非常好的可以用于芯片验证方面培训的专著，介绍了各种设计抽象级别和各阶段所涉及的验证方法及工具。本书以系统芯片为例，各章节有结合实际的代码和脚本可供读者参考，以帮助读者进一步深入理解。本书内容全面、翔实，可作为从事系统芯片设计的工程人员、研究者和高等院校相关专业师生的参考材料，对从事集成电路设计和验证的人员有较高的指导和借鉴价值。

石贤帅 亚创中国（Altran）半导体事业部总监

本书内容清晰、全面，是一本相当棒的芯片验证领域综合性的教科书。它与时俱进地囊括了时下主流的验证技术和方法学，为正在进入该领域的在校学生和验证工程师提供了广泛的视角和基础知识，同时也为深耕于验证技术的团队提供实践参考。无比钦佩作者能在繁忙工作之余完成这部了不起的著作，也殷切盼望本书能够助力本土验证工程师的快速成长，并成为芯片验证领域书籍的经典之作。

王定（Roman Wang） 超威半导体（AMD）上海 验证顾问

我有幸在 DVCon China 上认识作者。他的论文“Best Practices over Enhancing SoC Verification Efficiency”获得 2017 年 China DVCon 的 Best paper。而这本书之所以能吸引我，

在于这本书不仅仅讲解了基本的验证语言、验证方法，更在于它聚集了作者在实际项目中积累的很多实战经验，譬如如何提高验证的效率和完备性，如何进行验证项目的管理，如何针对不同的验证对象选择最合适、最高效的验证方法。作者在英特尔多年的验证经历和管理经验的总结和分享，无疑是这本书的最大精华。希望这本书能给予验证工作者启发和帮助，帮助国内培养出更多优秀的验证工程师。

郑先刚 高通 (Qualcomm) 上海 高级验证经理

刘斌的书让作为同行的我不禁汗颜，程序猿大都不爱写文档，这无疑影响了经验的传承。IC 行业的发展离不开一支优秀的验证工程师队伍，这样一本来自一线专家的精心之作一定可以帮助很多验证工程师，以及希望成为验证工程师的同学们。

刘沛宇 高通 (Qualcomm) 上海 验证经理

最吸引我的是这本书中提炼出来的实践指导思想，里面汇聚了众多资深验证工程师的经验，不仅有关键的技术知识点和验证视角，更从工程项目的角度把验证流程和验证工程师所具备的优秀品质提炼出来，引导我们如何成为一个验证技术领域的高手。

刘辉辉 海思半导体 芯片验证经理

本书自顶向下，从验证在芯片开发流程中所处的位置和目标，到芯片验证的流程和管理方法，再到具体的实现手段，给读者展示了目前主流芯片验证的生态环境和一位验证老司机的心路历程，以及芯片验证的未来发展方向。相信不论你是刚踏入验证大门的新手，还是已经在验证领域沉浸多年的专家，都能够在阅读这本书的过程中有所收获。

刘佑 海思半导体 高级验证工程师

这可能是国内首本系统介绍芯片验证理论、验证方法学及实践经验的书籍，帮助补齐了长久以来高校教育与企业需求之间缺失的一环。相信本书会成为每一位芯片验证工程师的必读书目，并将促进国内企业芯片验证水平的整体提升。

王宗静 联发博动科技 (MediaTek) 北京 资深部门经理

我觉得这是一部全面、深入而且“潮流”的芯片验证著作。经典的 SystemVerilog 和 UVM 介绍深入浅出，富有新意。验证计划和验证管理的阐述在同类书籍中很少有过，我相信这是作者多年工作实践经验的无私分享。近年热门的 Portable Stimulus 在书中竟然也有介绍，真是一个“福利”。不论是验证领域的新手还是老鸟，我认为都值得阅读本书。

王晓东 联发博动科技 (MediaTek) 北京 资深验证工程师

这是一本全面专业介绍芯片验证技术和管理的书籍。书中结合实例循序渐进介绍 SV 和 UVM 知识要点，可以使初学者快速掌握、搭建 UVM 环境。高级应用部分更是作者对多年实际项目验证经验的总结，相信很多同行在项目中遇到的疑难问题在此可以找到答案。我强烈推荐微电子专业学生、芯片验证工程师仔细阅读这本书，一定会受益匪浅。

张修钦 西安紫光国芯半导体有限公司 验证经理

验证是一个复杂的系统工程。验证团队需要在特定的质量、进度压力下，解决软硬件系统的各种问题，并得出置信的结论。验证团队不但需要熟悉验证方法学，更需要学会在复杂的场景中如何将验证方法学与项目实践相结合。本书是验证领域少有的理论方法与项目实践紧密结合的指导手册，是非常适合验证团队借鉴学习的读物。

吴杉 中兴微电子 芯片系统专家级工程师

很荣幸能提前读到刘斌的专著。刘斌是验证领域的资深专家，我和他相识于第一届中国 IC 功能设计与验证大会及展览（DVCon China 2017），刘斌在会上分享了提高 SoC 验证效率的技术和亲身经验，拿到了最佳论文奖。这本专著覆盖芯片验证的方方面面，还包含很多前沿技术，是集成电路设计验证课程的优秀教材，验证工程师们也能够从中获得启发。

黄劲楠 新思科技（Synopsys）上海工程主管、DVCon China 2018 年大会主席

刘斌撰写了一本符合中国认证教育需求的书。验证是 IC 设计发展最快的领域，中国对培养更多验证工程师有着巨大的需求。对于验证工程师，这本书是一本很好的概论，而且书中的 SystemVerilog 和 UVM 部分也是很好的实践参考。凭借在英特尔的经验，作者还撰写了一些验证高级应用，这将有助于负责验证方法学的工程师去优化其公司的验证流程。我很高兴作者用了大量的时间整理出这本对中国 IC 验证领域有贡献的书。

惠国瑜 明导（Mentor Graphics）上海 亚太区应用工程部资深总监

本书问世之前，市面上还没有一本能够将验证的概念、策略、流程、方法、语言和环境搭建等系统而清晰讲述的书籍。这些纷繁的知识被散落在各种书籍里面，这对验证工程师从全局上认识芯片验证造成了困难，而且这类书籍的知识理念比较陈旧。本书把验证工作需要了解的全部知识集中起来综合讲述，总结了作者多年的项目验证经验，包含了目前最新的验证方法。本书对验证初学者和有经验的验证工程师都具有非常好的参考价值。开玩笑地说，以往需要买五本书来参考对比，现在只需要一本就够了。

赵治心（猴哥） 辰芯科技 验证经理

目 录

第 1 章 芯片验证全视	1	2.1.6 ESL 系统集成视角	21
1.1 功能验证简介	1	2.2 验证的层次	23
1.2 验证的处境	4	2.2.1 模块级	24
1.2.1 验证语言的发展	4	2.2.2 子系统级	25
1.2.2 验证面临的挑战	5	2.2.3 芯片系统级	25
1.3 验证能力的 5 个维度	6	2.2.4 硅后系统级	25
1.3.1 完备性	6	2.3 验证的透明度	26
1.3.2 复用性	6	2.3.1 黑盒验证	26
1.3.3 高效性	7	2.3.2 白盒验证	27
1.3.4 高产出	7	2.3.3 灰盒验证	28
1.3.5 代码性能	8	2.4 激励的原则	29
1.4 验证的任务和目标	8	2.4.1 接口类型	29
1.4.1 按时保质低耗	8	2.4.2 序列颗粒度	30
1.4.2 芯片研发与客户反馈	9	2.4.3 可控性	31
1.4.3 缺陷增长曲线	10	2.4.4 组件独立性	31
1.5 验证的周期	11	2.4.5 组合自由度	31
1.5.1 验证周期中的检查点	11	2.5 检查的方法	32
1.5.2 功能详述	13	2.6 集成的环境	33
1.5.3 制定验证计划	14	2.6.1 验证平台	33
1.5.4 开发验证环境	14	2.6.2 待验设计	34
1.5.5 调试环境和 HDL 文件	14	2.6.3 运行环境	34
1.5.6 回归测试	15	2.6.4 验证管理	34
1.5.7 芯片生产	15	2.7 本章结束语	35
1.5.8 硅后系统测试	16	第 3 章 验证的方法	36
1.5.9 逃逸分析	16	3.1 动态仿真	37
1.6 本章结束语	16	3.1.1 定向测试	37
第 2 章 验证的策略	18	3.1.2 随机测试	38
2.1 设计的流程	18	3.1.3 基于覆盖率驱动的随机验证	40
2.1.1 TLM 模型的需求和 ESL 开发	18	3.1.4 基于 TLM 的随机验证	41
2.1.2 传统的系统设计流程	19	3.1.5 断言检查	41
2.1.3 ESL 系统设计流程	19	3.2 静态检查	44
2.1.4 语言的抽象级比较	20	3.2.1 语法检查	44
2.1.5 传统的系统集成视角	20	3.2.2 语义检查	44