

学术引领系列



国家科学思想库

中国学科发展战略

微纳电子学

中国科学院

 科学出版社



国家科学思想库

中国学科发展战略

微纳电子学

中国科学院

科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

中国学科发展战略·微纳电子学/中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2013

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-037932-0

I. ①微… II. ①中… III. ①微电子技术-学科发展-发展战略-中国
IV. ①TN4-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 134232 号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 樊 飞 程 凤 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 黄华斌

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013 年 8 月第一次印刷 印张: 22 3/4

字数: 400 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中国学科发展战略

指导组

组 长：白春礼

副组长：李静海 秦大河

成 员：詹文龙 朱道本 陈 颢

陈宜瑜 李 未 顾秉林

工作组

组 长：周德进

副组长：王敬泽 刘春杰

成 员：马新勇 林宏侠 张 恒

申倚敏 薛 淮 张家元

钱莹洁 傅 敏 刘伟伟

中国学科发展战略·微纳电子学

专 家 组

组 长：王阳元

成 员：周炳琨 李衍达 王启明

吴德馨 周兴铭 侯朝焕

王占国 沈绪榜 王 圩

雷啸霖 李 未 陈星弼

郑耀宗 夏建白 郑有炘

褚君浩 包为民 吴一戎

王 曦 许居衍 李树深

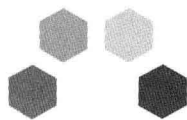
马俊如 黄 如 张 兴

魏少军 郝 跃 叶甜春

王永文

工 作 组

组 长：黄 如 张 兴
成 员：卜伟海 蔡 坚 曹立强
陈灵芝 成建兵 程玉华
戴 葵 傅云义 黄庆安
金 智 黎 明 李维平
李 昀 李志宏 刘洪刚
刘伟平 刘晓彦 刘新宇
闵 昊 钱 鹤 施 毅
苏 巍 孙宏伟 孙伟锋
唐 昊 陶铨有 王芹生
王文武 王晓亮 王 燕
王跃林 吴汉明 吴南健
夏善红 肖胜安 杨之诚
于 贵 于燮康 于宗光
余志平 张 波 张 东
赵建忠 赵元富 朱文辉
邹雪城



总 序

九层之台，起于累土^①

白春礼

近代科学诞生以来，科学的光辉引领和促进了人类文明的进步，在人类不断深化对自然和社会认识的过程中，形成了以学科为重要标志的、丰富的科学知识体系。学科不但是科学知识的基本的单元，同时也是科学活动的基本单元：每一学科都有其特定的问题域、研究方法、学术传统乃至学术共同体，都有其独特的历史发展轨迹；学科内和学科间的思想互动，为科学创新提供了原动力。因此，发展科技，必须研究并把握学科内部运作及其与社会相互作用的机制及规律。

中国科学院学部作为我国自然科学的最高学术机构和国家在科学技术方面的最高咨询机构，历来十分重视研究学科发展战略。2009年4月与国家自然科学基金委员会联合启动了“2011~2020年我国学科发展战略研究”19个专题咨询研究，并组建了总体报告研究组。在此工作基础上，为持续深入开展有关研究，学部于2010年底，在一些特定的领域和方向上重点部署了学科发展战略研究项目，研究成果现以“中国学科发展战略”丛书形式系列出版，供大家交流讨论，希望起到引导之效。

根据学科发展战略研究总体研究工作成果，我们特别注意到学

^① 题注：李耳《老子》第64章：“合抱之木，生于毫末；九层之台，起于累土；千里之行，始于足下。”

科发展的以下几方面的特征和趋势。

一是学科发展已越出单一学科的范围，呈现出集群化发展的态势，呈现出多学科互动共同导致学科分化整合的机制。学科间交叉和融合、重点突破和“整体统一”，成为许多相关学科得以实现集群式发展的重要方式，一些学科的境界更加模糊。

二是学科发展体现了一定的周期性，一般要经历源头创新期、创新密集区、完善与扩散期。并在科学革命性突破的基础上螺旋上升式发展，进入新一轮发展周期。根据不同阶段的学科发展特点，实现学科均衡与协调发展成为了学科整体发展的必然要求。

三是学科发展的驱动因素、研究方式和表征方式发生了相应的变化。学科的发展以好奇心牵引下的问题驱动为主，逐渐向社会需求牵引下的问题驱动转变；计算成为了理论、实验之外的第三种研究方式；基于动态模拟和图像显示等信息技术，为各学科纯粹的抽象数学语言提供了更加生动、直观的辅助表征手段。

四是科学方法和工具的突破与学科发展互相促进作用更加显著。技术科学的进步为激发新现象并揭示物质多尺度、极端条件下的本质和规律提供了积极有效手段。同时，学科的进步也为技术科学的发展和催生战略新兴产业奠定了重要基础。

五是文化、制度成为了促进学科发展的重要前提。崇尚科学精神的文化环境、避免过多行政干预和利益博弈的制度建设、追求可持续发展的目标和思想，将不仅极大促进传统学科和当代新兴学科的快速发展，而且也为人材成长并进而促进学科创新提供了必要条件。

我国学科体系系由西方移植而来，学科制度的跨文化移植及其在中国文化中的本土化进程，延续已达百年之久，至今仍未结束。

鸦片战争之后，代数学、微积分、三角学、概率论、解析几何、力学、声学、光学、电学、化学、生物学和工程科学等的近代科学知识被介绍到中国，其中有些知识成为一些学堂和书院的教学内容。1904年清政府颁布“癸卯学制”，该学制将科学技术分为格致科（自然科学）、农业科、工艺科和医学科，各科又分为诸多学

科。1905年清朝废除科举，此后中国传统学科体系逐步被来自西方的新学科体系取代。

民国时期现代教育发展较快，科学社团与科研机构纷纷创建，现代学科体系的框架基础成型，一些重要学科实现了制度化。大学引进欧美的通才教育模式，培育各学科的人才。1912年詹天佑发起成立中华工程师会，该会后来与类似团体合为中国工程师学会。1914年留学美国的学者创办中国科学社。1922年中国地质学会成立，此后，生理、地理、气象、天文、植物、动物、物理、化学、机械、水利、统计、航空、药学、医学、农学、数学等学科的学会相继创建。这些学会及其创办的《科学》、《工程》等期刊加速了现代学科体系在中国的构建和本土化。1928年国民政府创建中央研究院，这标志着现代科学技术研究在中国的制度化。中央研究院主要开展数学、天文学与气象学、物理学、化学、地质与地理学、生物科学、人类学与考古学、社会科学、工程科学、农林学、医学等学科的研究，将现代学科在中国的建设提升到了研究层次。

中华人民共和国建立之后，学科建设进入了一个新阶段，逐步形成了比较完整的体系。1949年11月新中国组建了中国科学院，建设以学科为基础的各类研究所。1952年，教育部对全国高等学校进行院系调整，推行苏联式的专业教育模式，学科体系不断细化。1956年，国家制定出《十二年科学技术发展远景规划纲要》，该规划包括57项任务和12个重点项目。规划制定过程中形成的“以任务带学科”的理念主导了以后全国科技发展的模式。1978年召开全国科学大会之后，科学技术事业从国防动力向经济动力的转变，推进了科学技术转化为生产力的进程。

科技规划和“任务带学科”模式都加速了我国科研的尖端研究，有力带动了核技术、航天技术、电子学、半导体、计算技术、自动化等前沿学科建设与新方向的开辟，填补了学科和领域的空白，不断奠定工业化建设与国防建设的科学技术基础。不过，这种模式在某些时期或多或少地弱化了学科的基础建设、前瞻发展与创新活力。比如，发展尖端技术的任务直接带动了计算机技术的兴起

与计算机的研制，但科研力量长期跟着任务走，而对学科建设着力不够，已成为制约我国计算机科学技术发展的“短板”。面对建设创新型国家的历史使命，我国亟待夯实学科基础，为科学技术的持续发展与创新能力的提升而开辟知识源泉。

反思现代科学学科制度在我国移植与本土化的进程，应该看到，20 世纪上半叶，由于西方列强和日本入侵，再加上频繁的内战，科学与救亡结下了不解之缘，新中国建立以来，更是长期面临着经济建设和国家安全的紧迫任务。中国科学家、政治家、思想家乃至一般民众均不得不以实用的心态考虑科学及学科发展问题，我国科学体制缺乏应有的学科独立发展空间和学术自主意识。改革开放以来，中国取得了卓越的经济建设成就，今天我们可以也应该静下心来思考“任务”与学科的相互关系，重审学科发展战略。

现代科学不仅表现为其最终成果的科学知识，还包括这些知识背后的科学方法、科学思想和科学精神，以及让科学得以运行的科学体制，科学家的行为规范和科学价值观。相对于我国的传统文化，现代科学是一个“陌生的”、“移植的”东西。尽管西方科学传入我国已有一百多年的历史，但我们更多地还是关注器物层面，强调科学之实用价值，而较少触及科学的文化层面，未能有效而普遍地触及到整个科学文化的移植和本土化问题。中国传统文化以及当今的社会文化仍在深刻地影响着中国科学的灵魂。可以说，迄 20 世纪结束，我国移植了现代科学及其学科体制，却在很大程度上拒斥与之相关的科学文化及相应制度安排。

科学是一项探索真理的事业，学科发展也有其内在的目标，探求真理的目标。在科技政策制定过程中，以外在的目标替代学科发展的内在目标，或是只看到外在目标而未能看到内在目标，均是不适当的。现代科学制度化进程的含义就在于：探索真理对于人类发展来说是必要的和有至上价值的，因而现代社会和国家须为探索真理的事业和人们提供制度性的支持和保护，须为之提供稳定的经费支持，更须为之提供基本的学术自由。

20 世纪以来，科学与国家的目的不可分割地联系在一起，科

学事业的发展不可避免地要接受来自政府的直接或间接的支持、监督或干预，但这并不意味着，从此便不再谈科学自主和自由。事实上，在现当代条件下，在制定国家科技政策时充分考虑“任务”和学科的平衡，不但是最大限度实现学术自由、提升科学创造活力的有效路径，同时也是让科学服务于国家和社会需要的最有效的做法。这里存在着这样一种辩证法：科学技术系统只有在具有高度创造活力的情形下，才能在创新型国家建设过程中发挥最大作用。

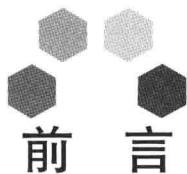
在全社会范围内创造一种允许失败、自由探讨的科研氛围；尊重学科发展的内在规律，让科研人员充分发挥自己的创造潜能；充分尊重科学家的个人自由，不以“任务”作为学科发展的目标，让科学共同体自主地来决定学科的发展方向。这样做的结果往往比事先规划要更加激动人心。比如，19世纪末德国化学学科的发展史就充分说明了这一点。从内部条件上讲，首先是由于洪堡兄弟所创办的新型大学模式，主张教与学的自由、教学与研究相结合，使得自由创新成为德国的主流学术生态。从外部环境来看，德国是一个后发国家，不像英、法等国拥有大量的海外殖民地，只有依赖技术创新弥补资源的稀缺。在强大爱国热情的感召下，德国化学家的创新激情迸发，与市场开发相结合，在染料工业、化学制药工业方面进步神速，十余年间便领先于世界。

中国科学院作为国家科技事业“火车头”，有责任提升我国原始创新能力，有责任解决关系国家全局和长远发展的基础性、前瞻性、战略性重大科技问题，有责任引领中国科学走自主创新之路。中国科学院学部汇聚了我国优秀科学家的代表，更要责无旁贷地承担起引领中国科技进步和创新的重任，系统、深入地对自然科学各学科进行前瞻性战略研究。这一研究工作，旨在系统梳理世界自然科学各学科的发展历程，总结各学科的发展规律和内在逻辑，前瞻各学科中长期发展趋势，从而提炼出学科前沿的重大科学问题，提出学科发展的新概念和新思路。开展学科发展战略研究，也要面向我国现代化建设的长远战略需求，系统分析科技创新对人类社会发展和我国现代化进程的影响，注重新技术、新方法和新手段研究，

提炼出符合中国发展需求的新问题和重大战略方向。开展学科发展战略研究，还要从支撑学科发展的软、硬件环境和建设国家创新体系的整体要求出发，重点关注学科政策、重点领域、人才培养、经费投入、基础平台、管理体制等核心要素，为学科的均衡、持续、健康发展出谋划策。

2010年，在中国科学院各学部常委会的领导下，各学部依托国内高水平科研教育等单位，积极酝酿和组建了以院士为主体、众多专家参与的学科发展战略研究组。经过各研究组的深入调查和广泛研讨，形成了“中国学科发展战略”丛书，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。学部诚挚感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家们！

按照学部“十二五”工作规划部署，学科发展战略研究将持续开展，希望学科发展战略系列研究报告持续关注前沿，不断推陈出新，引导广大科学家与中国科学院学部一起，把握世界科学发展动态，夯实中国科学发展的基础，共同推动中国科学早日实现创新跨越！



前言

战略研究是通过开展系统、全面的分析和研究，认识影响组织生存与持续发展的重要事物变化的规律和特点，预测其发展趋势，提出可供选择的目标与路径，为重大的、带全局性的或决定全局的谋划提供科学依据。战略研究的最终目的是提高驾驭规律的自觉性。

微纳电子学科发展战略研究，是通过对微纳电子学科的发展历史、学科前瞻、技术预见、市场规律进行分析，把握国家现实和长远需求，把握世界科技发展前沿趋势，提出可供选择的学科发展方向、战略、目标与重点，为学科发展的战略选择提供科学支撑。

本研究工作在中国科学院信息技术科学部的领导下开展，由中国科学院院士王阳元、周炳琨、李衍达、王启明、吴德馨、周兴铭、侯朝焕、王占国、沈绪榜、王圩、雷啸霖、李未、陈星弼、郑耀宗、夏建白、郑有炆、褚君浩、包为民、吴一戎、王曦、许居衍、李树深，欧亚科学院院士马俊如，以及 80 余位微纳电子学领域的专家、学者共同承担。

北京大学的王阳元院士为本研究专家组组长，黄如教授与张兴教授为本研究工作组组长。

本书分为十章。

第一章由北京大学的王阳元院士和王永文研究员完成。从历史的视野和宏观的角度研究了农业社会、工业社会和信息社会的进程及相关发展规律，分别从集成电路的技术、产品、市场、产业结构、产业投资等方面剖析了微电子学科和产业发展的脉络，介绍了今后微纳电子技术在各个领域的发展趋势。

第二章对新结构、新材料和新原理器件的新型微纳电子器件进

行分析,讨论了新器件在下一代集成电路技术中的应用前景,为我国微纳电子器件研究的发展方向提供相关建议,针对不同应用领域的新器件研究方向分别提出了政策扶持建议和具体措施。本章由北京大学黄如教授负责组织,并与北京大学黎明研究员、清华大学钱鹤教授、中国科学院微电子研究所王文武研究员共同编写。

第三章包含五部分内容:集成电路设计领域的发展趋势与关键问题、SoC与集成电路设计、EDA技术与工具、航天微电子技术、中国集成电路设计业发展的机遇与预测,由中国半导体行业协会集成电路设计分会王芹生理事长负责组织,与清华大学魏少军教授、华中科技大学戴葵教授和邹雪城教授、复旦大学闵昊教授、北京华大九天软件有限公司刘伟平研究员、中国航天科技集团公司第九研究院第七七二研究所赵元富研究员、《中国集成电路》杂志社陶铨有副社长、上海市集成电路行业协会赵建忠常务副秘书长、清华大学尹首一副教授共同编写。

第四章在调研的基础上分析了目前国内国际在集成电路大生产工艺技术方面的进展及大生产工艺技术领域存在的关键问题,并对该领域的未来发展趋势进行了预测,结合我国目前该领域的现状,提出了有关政策和措施的建议。本章由中芯国际集成电路制造有限公司(简称中芯国际)吴汉明研究员、卜伟海博士等共同编写。

第五章主要介绍了芯片—封装—系统的协同设计,封装测试中专用设计工具和方法缺失的挑战、封装堆叠、芯片堆叠、硅通孔技术与硅基板技术、嵌入式基板、新型引线键合技术与方法、先进的倒装芯片和TSV互连技术、新材料的开发与应用、系统级封装测试策略和圆片级/系统级老化方案,多影响因素及其耦合作用下的系统级封装可靠性问题。本章由江苏长电科技股份有限公司于燮康副董事长负责组织,与清华大学蔡坚教授、北京大学程玉华教授、中国科学院微电子研究所曹立强研究员、中国电子科技集团公司第五十八研究所(简称中电集团五十八所)于宗光研究员、江苏长电科技股份有限公司李维平副总经理、深南电路有限公司杨之诚副总经理、北京自动测试技术研究所张东所长、南通富士通微电子股份

有限公司唐昊副主任、天水华天科技股份有限公司朱文辉总工程师、无锡华润安盛科技有限公司孙宏伟技术经理、江苏长电科技股份有限公司陈灵芝共同编写。

第六章针对集成电路的材料进行探讨,提出“一代材料,一代器件”的观点,描述了新材料对集成电路器件发展的影响,对我国重点支持的领域提出了建议。本章由西安电子科技大学郝跃教授负责组织,与中国科学院微电子研究所刘新宇研究员、中国科学院半导体研究所王晓亮研究员、中国科学院微电子研究所刘洪刚研究员共同编写。

第七章概要介绍了功率半导体器件与集成技术的国内外发展现状和技术趋势,梳理了其未来发展趋势及相应的关键问题,同时根据我国功率半导体技术的发展现状,对未来我国功率半导体领域的发展方向和重点发展技术进行了展望并提出相应建议。本章由中电集团五十八所于宗光研究员负责组织,与东南大学孙伟锋教授、电子科技大学张波教授、上海华虹 NEC 电子有限公司(简称华虹 NEC)肖胜安研究员、无锡华润上华科技有限公司苏巍副总经理、南京邮电大学成建兵教授共同编写。

第八章从学科基础、器件与系统、政策与措施三个方面阐述了 MEMS/NEMS 的发展现状与遇到的问题。本章由中国科学院上海微系统与信息技术研究所王跃林研究员、东南大学黄庆安教授、北京大学李志宏教授、中国科学院微电子研究所夏善红研究员共同编写。

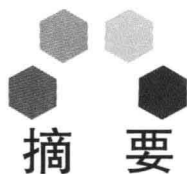
第九章回顾和展望了碳基纳米技术的两个重要研究领域:石墨烯和碳纳米管,并重点评述了相关的基础科学和技术研究进展。本章由南京大学施毅教授负责组织,与中国科学院微电子研究所金智研究员、北京大学傅云义教授、中国科学院化学研究所于贵研究员、中国科学院半导体研究所吴南健研究员、南京大学李昀副教授共同编写。

第十章回顾了自 1964 年密度泛函理论(DFT)提出而引入了第一原理计算电子学以来的近半个世纪,固体物理在理论、材料与

实验上的进展，重点分析了与集成电路和计算机应用有关的重大进展，内容包括固体理论与计算电子学、低维与超导材料及新型固态器件三个部分。本章由清华大学余志平教授负责组织，与清华大学王燕教授、北京大学刘晓彦教授共同编写。

中国科学院学部微纳电子学科发展战略研究组

2013年1月



微电子学科源于 1947 年晶体管的诞生和 1958 年集成电路的发明。60 余年来，微电子学科的研究取得了长足进展，逐步由微电子学科演变为微纳电子学科。集成电路是微纳电子学科的主要研究对象和代表产品，以集成电路为基础的信息产业已成为世界第一大产业。集成电路的产业规模、科学技术水平和创新能力正在成为衡量一个强国综合国力的重要标志，成为国际政治、军事和经济斗争的焦点。

学科研究是产业发展的基础。本书从基础理论、器件结构、材料应用、电路设计、产品制造和产业结构等各个方面系统地研究了微纳电子学科及其产业的发展规律，并结合国内的实际情况为我国微纳电子学科及其产业的发展方向提出了相关建议。

今后，微纳电子学科将沿着多元化的途径持续发展，即将进入以提高性能/功耗比的“后摩尔时代”。一是继续按比例缩小；二是多功能化，即在 SoC (system on chip) 的基础上以 SiP (system in package) 的方式完成多功能集成；三是新器件结构和新材料（如化合物半导体）的应用将成为微纳电子学科及其产业发展的驱动力；四是在进入纳米尺度后，传统半导体物理理论将有可能产生革命性的突破。在这些多元化途径交汇与融合的过程中，将为我国的微纳电子学科和产业实现跨越式发展提供宝贵的创新机遇。