

总 序

党的二十大胜利召开，吹响了以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的前进号角。习近平总书记强调“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”^①，明确要求到2035年要建成教育强国、科技强国、人才强国。新时代新征程对科技界提出了更高的要求。当前，世界科学技术发展日新月异，不断开辟新的认知疆域，并成为带动经济社会发展的核心变量，新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势跃迁、快速迭代的关键阶段。开展面向2035年的中国学科及前沿领域发展战略研究，紧扣国家战略需求，研判科技发展大势，擘画战略、锚定方向，找准学科发展路径与方向，找准科技创新的主攻方向和突破口，对于实现全面建成社会主义现代化“两步走”战略目标具有重要意义。

当前，应对全球性重大挑战和转变科学研究范式是当代科学的时代特征之一。为此，各国政府不断调整和完善科技创新战略与政策，强化战略科技力量部署，支持科技前沿态势研判，加强重点领域研发投入，并积极培育战略新兴产业，从而保证国际竞争实力。

擘画战略、锚定方向是抢抓科技革命先机的必然之策。当前，新一轮科技革命蓬勃兴起，科学发展呈现相互渗透和重新会聚的趋

^① 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告. 北京: 人民出版社, 2022: 33.

势，在科学逐渐分化与系统持续整合的反复过程中，新的学科增长点不断产生，并且衍生出一系列新兴交叉学科和前沿领域。随着知识生产的不断积累和新兴交叉学科的相继涌现，学科体系和布局也在动态调整，构建符合知识体系逻辑结构并促进知识与应用融通的协调可持续发展的学科体系尤为重要。

擘画战略、锚定方向是我国科技事业不断取得历史性成就的成功经验。科技创新一直是党和国家治国理政的核心内容。特别是党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央明确了我国建成世界科技强国的“三步走”路线图，实施了《国家创新驱动发展战略纲要》，持续加强原始创新，并将着力点放在解决关键核心技术背后的科学问题上。习近平总书记深刻指出：“基础研究是整个科学体系的源头。要瞄准世界科技前沿，抓住大趋势，下好‘先手棋’，打好基础、储备长远，甘于坐冷板凳，勇于做栽树人、挖井人，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，夯实世界科技强国建设的根基。”^①

作为国家在科学技术方面最高咨询机构的中国科学院（简称中科院）和国家支持基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委），在夯实学科基础、加强学科建设、引领科学研究发展方面担负着重要的责任。早在新中国成立初期，中科院学部即组织全国有关专家研究编制了《1956—1967年科学技术发展远景规划》。该规划的实施，实现了“两弹一星”研制等一系列重大突破，为新中国逐步形成科学技术研究体系奠定了基础。自然科学基金委自成立以来，通过学科发展战略研究，服务于科学基金的资助与管理，不断夯实国家知识基础，增进基础研究面向国家需求的能力。2009年，自然科学基金委和中科院联合启动了“2011—2020年中国学科发展

^① 习近平. 努力成为世界主要科学中心和创新高地 [EB/OL]. (2021-03-15). http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c_1127209130.htm[2022-03-22].

战略研究”。2012年，双方形成联合开展学科发展战略研究的常态化机制，持续研判科技发展态势，为我国科技创新领域的方向选择提供科学思想、路径选择和跨越的蓝图。

联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”，是中科院和自然科学基金委落实新时代“两步走”战略的具体实践。我们面向2035年国家发展目标，结合科技发展新特征，进行了系统设计，从三个方面组织研究工作：一是总论研究，对面向2035年的中国学科及前沿领域发展进行了概括和论述，内容包括学科的历史演进及其发展的驱动力、前沿领域的发展特征及其与社会的关联、学科与前沿领域的区别和联系、世界科学发展的整体态势，并汇总了各个学科及前沿领域的发展趋势、关键科学问题和重点方向；二是自然科学基础学科研究，主要针对科学基金资助体系中的重点学科开展战略研究，内容包括学科的科学意义与战略价值、发展规律与研究特点、发展现状与发展态势、发展思路与发展方向、资助机制与政策建议等；三是前沿领域研究，针对尚未形成学科规模、不具备明确学科属性的前沿交叉、新兴和关键核心技术领域开展战略研究，内容包括相关领域的战略价值、关键科学问题与核心技术问题、我国在相关领域的研究基础与条件、我国在相关领域的发展思路与政策建议等。

三年多来，400多位院士、3000多位专家，围绕总论、数学等18个学科和量子物质与应用等19个前沿领域问题，坚持突出前瞻布局、补齐发展短板、坚定创新自信、统筹分工协作的原则，开展了深入全面的战略研究工作，取得了一批重要成果，也形成了共识性结论。一是国家战略需求和技术要素成为当前学科及前沿领域发展的主要驱动力之一。有组织的科学研究及源于技术的广泛带动效应，实质化地推动了学科前沿的演进，夯实了科技发展的基础，促进了人才的培养，并衍生出更多新的学科生长点。二是学科及前沿

领域的发展促进深层次交叉融通。学科及前沿领域的发展越来越呈现出多学科相互渗透的发展态势。某一类学科领域采用的研究策略和技术体系所产生的基础理论与方法论成果，可以作为共同的知识基础适用于不同学科领域的多个研究方向。三是科研范式正在经历深刻变革。解决系统性复杂问题成为当前科学发展的主要目标，导致相应的研究内容、方法和范畴等的改变，形成科学研究的多层次、多尺度、动态化的基本特征。数据驱动的科研模式有力地推动了新时代科研范式的变革。四是科学与社会的互动更加密切。发展学科及前沿领域愈加重要，与此同时，“互联网+”正在改变科学交流生态，并且重塑了科学的边界，开放获取、开放科学、公众科学等都使得越来越多的非专业人士有机会参与到科学活动中来。

“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”系列成果以“中国学科及前沿领域2035发展战略丛书”的形式出版，纳入“国家科学思想库-学术引领系列”陆续出版。希望本丛书的出版，能够为科技界、产业界的专家学者和技术人员提供研究指引，为科研管理部门提供决策参考，为科学基金深化改革、“十四五”发展规划实施、国家科学政策制定提供有力支撑。

在本丛书即将付梓之际，我们衷心感谢为学科及前沿领域发展战略研究付出心血的院士专家，感谢在咨询、审读和管理支撑服务方面付出辛劳的同志，感谢参与项目组织和管理工作的中科院学部的丁仲礼、秦大河、王恩哥、朱道本、陈宜瑜、傅伯杰、李树深、李婷、苏荣辉、石兵、李鹏飞、钱莹洁、薛淮、冯霞，自然科学基金委的王长锐、韩智勇、邹立尧、冯雪莲、黎明、张兆田、杨列勋、高阵雨。学科及前沿领域发展战略研究是一项长期、系统的工作，对学科及前沿领域发展趋势的研判，对关键科学问题的凝练，对发展思路及方向的把握，对战略布局的谋划等，都需要一个不断深化、积累、完善的过程。我们由衷地希望更多院士专家参与到未来的学

总 序

科及前沿领域发展战略研究中来，汇聚专家智慧，不断提升凝练科学问题的能力，为推动科研范式变革，促进基础研究高质量发展，把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，服务支撑我国高水平科技自立自强和建设世界科技强国夯实根基做出更大贡献。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”

联合领导小组

2023年3月

前 言

半导体集成电路芯片技术作为信息产业发展的基石，已经深深渗透到经济社会的各个领域，并在推动产业变革和技术进步中发挥着至关重要的作用。当前，全球半导体芯片产业进入重大的发展调整期，国际贸易的复杂趋势给半导体芯片产业的发展带来新的挑战。一方面，随着技术水平的持续提升和产业规模的不断扩大，半导体芯片产业已经成为支撑全球数字经济发展的关键支柱产业。另一方面，在摩尔定律发展规律放缓和制造成本提高的双重压力下，未来半导体芯片产业发展必将从应用需求角度出发，实现从集成度驱动向功能驱动的转变，半导体设计和制造也将迎来全新的技术革命和产业变革。

对于我国而言，信息产业作为战略性新兴产业之一，发挥着支撑数字经济发展和推动产业变革的重要作用，未来其潜力空间仍然广阔。要实现信息产业的蓬勃发展，关键在于掌握核心技术，特别是加快集成电路与光电芯片等关键技术的自主创新步伐。目前，中国集成电路从材料、设备、工艺到设计的 EDA 工具都面临一些现实难题。这些问题若不解决，将对国民经济、社会发展、国家信息安全和国防安全产生不利影响。可以肯定的是，到 2035 年甚至更长的时间里，集成电路芯片仍将是推动社会发展和人类进步的核心与关键，是推动人类从信息时代进入智能时代的不可替代的载体。没有

芯片技术和产业，信息技术和产业就无从谈起，更不用说信息和智能时代了。

在此背景下，本书的出版具有重要的时代意义。本书选择集成电路和光电芯片这两个关键技术作为研究对象，提出了在材料、工艺、设备、设计等多个方面实现自主可控的技术路线和发展路径，对产业发展具有重要的指导意义，从多个角度对其发展现状和未来趋势进行深入剖析，在此基础上对实现产业自立自强提出切实可行的发展战略和对策建议，为我国信息产业的可持续发展指明方向。

本书的研究工作由国家自然科学基金委员会和中国科学院联合组织实施，涉及集成电路和光电芯片领域多位专家学者。研究过程充分借鉴了产业发展规律和世界技术发展趋势，并综合考虑了我国产业基础和技术实力，最终形成了本书的研究框架和研究成果，具有较高的科学性、针对性和实用性。

本书就上述集成电路与光电芯片发展方向、关键技术、发展现状和趋势，以及发展战略展开技术论证，并给出一些发展措施与建议。

第一章为先进 CMOS 器件与工艺，由张卫（复旦大学）、王欣然（南京大学）、黎明（北京大学）牵头撰写。

第二章为 FD-SOI 技术，由韩根全（西安电子科技大学）、欧欣（中国科学院上海微系统与信息技术研究所）、玉虢（之江实验室）牵头撰写。

第三章为半导体存储器技术，由赵巍胜（北京航空航天大学）、刘琦（复旦大学）、蔡一茂（北京大学）牵头撰写。

第四章为集成电路设计，由朱樟明（西安电子科技大学）、刘雷波（清华大学）、曾晓洋（复旦大学）牵头撰写。

第五章为集成电路设计自动化，由曾璇（复旦大学）、杨军（东南大学）、初秀琴（西安电子科技大学）牵头撰写。

第六章为跨维度异质集成，由朱健（中国电子科技集团公司第五十五研究所）、欧欣（中国科学院上海微系统与信息技术研究所）牵头撰写。

第七章为先进封装技术，由刘胜（武汉大学）牵头撰写。

第八章为人工智能理论、器件与芯片，由吴华强（清华大学）、杨玉超（北京大学）牵头撰写。

第九章为碳基芯片，由张志勇（北京大学）、孙东明（中国科学院金属研究所）牵头撰写。

第十章为（超）宽禁带半导体器件和芯片，由张进成（西安电子科技大学）、马晓华（西安电子科技大学）、郑雪峰（西安电子科技大学）牵头撰写。

第十一章为量子芯片，由郭国平（中国科技大学）、张建军（中国科学院物理研究所）、程然（浙江大学）牵头撰写。

第十二章为柔性电子芯片，由王建浦（南京工业大学）、陈永华（南京工业大学）牵头撰写。

第十三章为混合光子集成技术，由刘永（电子科技大学）、陈向飞（南京大学）牵头撰写。

第十四章为硅基光电子集成技术，由薛春来（中国科学院半导体研究所）、王兴军（北京大学）、肖希（国家信息光电子创新中心，中国信息通信科技集团有限公司）牵头撰写。

第十五章为微波光子芯片与集成，由李明（中国科学院半导体研究所）、闫连山（西南交通大学）牵头撰写。

第十六章为光电融合与集成技术，由祝宁华（中国科学院半导体研究所）牵头撰写。

第十七章为光子智能芯片技术，由邹卫文（上海交通大学）、邹喜华（西南交通大学）、董建绩（华中科技大学）、项水英（西安电子科技大学）牵头撰写。

全书绪论和总结展望与发展建议由郝跃（西安电子科技大学）和韩根全（西安电子科技大学）牵头撰写，书稿的协调工作由韩根全（西安电子科技大学）和姚丹阳（西安电子科技大学）共同完成。

我相信，本书的出版将为相关政府部门和企业单位制定发展战略提供有力参考，也必将指引和帮助广大科技工作者推进关键技术创新，服务于产业升级和产品优化，为实现我国信息产业的自主可控发展和产业竞争力提高做出应有的贡献。展望未来，随着人工智能、大数据、云计算等新技术的广泛应用，新一代信息技术产业正在加速崛起。未来的竞争重心将逐渐从硬件制造向整体解决方案和关键技术创新转变。要适应产业变革的趋势，我国集成电路产业和光电子产业必须在提高自主创新能力的同时，加快融合创新和交叉创新步伐，培育新兴领域的产业生态，实现产业升级和转型。需要说明的是，鉴于半导体芯片技术的不断发展和进步，本报告中难免会有不足甚至不当之处，诚挚恳请广大读者谅解并给予批评指正。

最后，再次对参与本书研究和撰写的专家学者表示诚挚的谢意。让我们携手共进，不断进行技术创新，促进产学研用深度融合，推动半导体集成电路芯片技术和产业持续发展。

郝 跃

《中国集成电路与光电芯片 2035 发展战略》编写组组长
2022 年 6 月

摘 要

集成电路自 20 世纪 50 年代问世以来，其量产技术遵循着摩尔定律已经发展至 3 nm 工艺技术节点和 3D 集成时代，芯片集成度持续增大，芯片性能持续增强。以此为基础的电子信息技术加速创新，万物互联等信息技术全面渗透到经济社会的方方面面，以集成电路为基础的信息产业成为世界第一大产业。当前，随着集成电路晶体管特征尺寸逼近工艺和物理极限，未来半导体产业发展将进入以新结构、新机理、新材料器件为核心竞争角逐的后摩尔时代。在这个大背景下，一方面，硅集成电路将继续沿着摩尔定律按比例缩小的方向前进；另一方面，诸如感存算一体芯片、人工智能类脑芯片以及颠覆性的量子芯片等技术将成为集成电路研究的新方向，从器件到架构的前沿创新支撑着微电子技术不断发展。同时，光电芯片经过长期的技术积累也已经开始在信息产业中广泛应用，尤其是通信产业中的光通信芯片已经成为极其重要且不可或缺的部分。未来，光电芯片将面向大容量、低功耗、集成化与智能化方向发展的新需求，逐步突破多功能材料体系异质集成、光电融合集成和多维度、多参量、多功能、高效率调控及可重构等关键技术。

集成电路和光电芯片技术是信息产业的基石与强大推动力，对提升国家综合实力和保障国家安全具有极为重要的战略意义。尤其是在信息技术强国对我国普遍实行严格技术禁运和打压的国际环境

下，当前和今后一段时期是我国集成电路和光电芯片技术发展的重要战略机遇期与攻坚期，加强自主集成电路和光电芯片技术的研发工作，布局突破相关关键技术并拥有自主知识产权，实现集成电路产业的自主可控发展是我国当前的重大战略需求。本书针对当下集成电路和光电芯片产业的关键技术和难题，聚焦器件工艺、存储、设计、自动化、异质集成、先进封测等核心领域，研究其发展规律和趋势，并探讨实现创新突破的方向和策略。此外，在突破现有存储计算瓶颈的新器件和新架构领域，本书将从人工智能芯片技术、碳基芯片技术、（超）宽禁带材料和芯片技术，以及量子计算器件和芯片技术等方面，分析大数据和物联网（internet of things, IoT）时代下，信息技术产业新兴方向的发展趋势和可行性技术路线。在和集成电路应用紧密结合的光电融合领域，本书将从柔性光电子、混合光电子、硅基光电子、微波光电子，以及智能光电子的芯片集成及光电融合等多个方面，分析光电技术面向新信息化场景下的前沿发展动向。

面向未来芯片应用发展多元化和专用化趋势，在后摩尔时代，集成电路芯片技术将通过器件、工艺和架构的协同优化创新，逐渐从传统的冯·诺依曼范式向高算力、高密度、低成本、低功耗、多功能集成的新型芯片方向发展。此外，由于光电子集成芯片在光域强大的调控能力和集成潜力，在未来的应用中，实现数据高速传输和处理的光电子集成芯片也将是集成电路的一个重要发展方向。本书将围绕上述集成电路和光电芯片相关方向展开研究和探讨，并为我国集成电路发展实现科技创新引领和产业自立自强提供战略性参考和发展建议。

Abstract

Since the first demonstration of the integrated circuit (IC) in the 1950s, IC mass production technology, following the well-known Moore's law, has advanced into 3 nm node and 3D integration, the chip integration level continues to increase, and the chip performance continues to improve. Relied on the highly developed transistor technology, the information technology (IT) industry evolves into the electronic era, which further accelerates the application of smart systems like the internet of things (IoT), Big Data/Clouds, etc. into almost every aspect of the world, promoting the IC-based IT applications to become the world's largest industry. Currently, as the IC transistor scaling is approaching its physical limits, the semiconductor industry has entered the "post-Moore" era which splits off its partial efforts to the exploration of new structures, new mechanisms, and new materials. On the one hand, silicon-based ICs will continue to scale down according to Moore's law. On the other hand, novel technologies such as in-memory computing chips, artificial intelligence (AI) brain-like chips, and disruptive quantum chips become the future IC research directions, and the cutting-edge innovations from devices to architectures support the continuous development of microelectronics technology. Meanwhile, optoelectronic chips have been widely used in the information industry after a long period of technological accumulation. In particular, the optical

communication chip has become a very important and irreplaceable product in the communication industry. In the future, optoelectronic chips will face more challenging requirements in terms of larger capacity, lower power consumption, more complicated integration and more intelligent. Breakthroughs are necessary to realize key technologies such as multifunctional heterogeneous integration, optoelectronic integration, and multi-dimensional, multi-parameter, multi-functional, high-efficiency modulation, and reconfiguration.

The IC and optoelectronic chip technology are the cornerstones and powerful driving force of the information industry, and also play a strategic role in comprehensive national power and national security. In the current stage and the near future, China is in a critical period to develop its logic and optoelectronic IC technology, especially when the global environment is not welcoming international collaborations. Consequently, China has to gradually and strategically develop its IC industry chain including the intellectual properties of IC technologies, equipment, supply chains, packaging and testing supports, etc. To solve the key technological issues in the current IC and optoelectronic chip industry, this strategy book studies the development rules and trends in the fields including device manufacturing technology, storage technology, design and automation, heterogeneous integration, advanced packaging and testing, accompanied by the in-depth discussion on the direction and methods to achieve innovative breakthroughs in these fields. In addition, in the fields of novel devices and new architectures which outperform the existing storage and computing capabilities, this book will analyze their development trend and feasibility for the Big Data and IoT-related areas like the artificial intelligence chip technology, carbon-based chip technology, (ultra) wideband gap materials and chip technology, and quantum computing devices and chip technology, etc.

In the field of optoelectronic fusion technology, which is closely related to IC technology, the book will analyze the cutting-edge development trends in the new IT application scenarios from the aspects of flexible optoelectronics, hybrid optoelectronics, silicon-based optoelectronics, microwave photonics, as well as chip integration of smart photonic chips and fusion for optoelectronic chips.

With regard to the diversification and specialization of chip applications in the post-Moore era, the traditional IC technology will gradually migrate from the von Neumann architecture to the more advanced architectures with higher computational power and density, lower cost and power consumption, multi-functions with design optimization and device innovations. In addition, due to the strong regulatory capacity and integration potential of optoelectronic chips in the optical area, optoelectronic chips that can realize high-speed data transmission and processing will be an important development direction in future applications. The book will carry out investigations and discussions on the above-mentioned topics related to ICs and optoelectronic chips, and meanwhile, provide a strategic reference and guidance for our nation to achieve a leading technological position in the international IC industry.

目 录

总序 / i

前言 / vii

摘要 / xi

Abstract / xiii

绪论 / 1

第一节 科学意义和战略价值 / 1

第二节 产业发展规律与特点 / 4

第三节 发展现状与挑战 / 6

第四节 发展趋势与本书安排 / 9

第一章 先进 CMOS 器件与工艺 / 12

第一节 科学意义与战略价值 / 12

第二节 技术创新与挑战 / 13

一、堆叠纳米线/纳米片环栅晶体管器件 / 13

二、3D 垂直集成器件 / 18

三、新机制、新材料半导体器件 / 21

第三节 工艺技术创新与挑战 / 23

- 一、光刻领域技术发展与挑战 / 23
- 二、器件互连寄生问题与挑战 / 27
- 三、器件可靠性与挑战 / 31

第四节 协同优化设计 / 35

- 一、DTCO 技术发展现状及形成 / 35
- 二、DTCO 关键技术和发展方向 / 36

第二章 FD-SOI 技术 / 38

第一节 科学意义与战略价值 / 38

第二节 技术比较 / 39

第三节 技术现状 / 40

- 一、FD-SOI 技术产业链 / 41
- 二、先进工艺厂商对 FD-SOI 工艺技术的推进 / 41
- 三、FD-SOI 技术的应用领域 / 42

第四节 技术发展方向 / 44

- 一、应变 SOI / 44
- 二、绝缘层上的锗硅 (SiGeOI) / 44
- 三、绝缘层上的锗 (GeOI) / 45
- 四、绝缘体上的 III - V 族半导体 (III - V 族 OI) / 45
- 五、XOI / 46
- 六、万能离子刀技术 / 46

第五节 技术路线与对策 / 47

第三章 半导体存储器技术 / 49

第一节 存储器概述 / 49

一、半导体存储器产业发展现状 / 49

二、DRAM 技术及发展趋势 / 52

三、Flash 技术及发展趋势 / 54

四、面临的问题与挑战 / 57

第二节 新型存储器技术 / 59

一、阻变式存储器 / 59

二、磁性随机存取存储器 / 63

三、相变存储器 / 68

四、铁电存储器 / 73

第三节 总结与展望 / 77

一、DRAM 发展展望 / 79

二、Flash 发展展望 / 80

三、RRAM 发展展望 / 81

四、MRAM 发展展望 / 81

五、PCM 发展展望 / 82

六、铁电存储器发展展望 / 82

第四章 集成电路设计 / 84

第一节 科学意义与战略价值 / 84

第二节 通用处理器 / 85

一、重要意义及发展现状 / 85

二、处理器关键技术及展望 / 86

三、技术展望 / 88

四、技术及产业发展建议 / 89

第三节 智能处理器 / 89

- 一、战略地位与发展规律 / 89
- 二、发展现状与特点 / 90
- 三、智能处理器发展与展望 / 93

第四节 FPGA 及可重构计算芯片 / 93

- 一、战略地位 / 93
- 二、发展规律与研究特点 / 94
- 三、发展现状 / 96
- 四、发展展望 / 97

第五节 模拟前端及数据转换器 / 98

- 一、战略意义与发展规律 / 98
- 二、发展现状和研究特点 / 100
- 三、发展展望 / 102

第六节 射频集成电路 / 103

- 一、战略地位 / 103
- 二、发展规律与研究特点 / 104
- 三、发展现状与技术趋势 / 105
- 四、发展布局 / 106

第七节 图像传感器及探测器 / 107

- 一、战略地位 / 107
- 二、发展规律与研究特点 / 108
- 三、发展现状 / 108
- 四、发展展望 / 109

第五章 集成电路设计自动化 / 112

第一节 科学意义与战略价值 / 112

第二节 前沿领域的现状及其形成 / 113

第三节 关键科学与技术问题 / 119

一、面向大规模复杂数字系统的形式验证、逻辑综合方法 / 119

二、电子设计的关键环节从自动化迈向智能化 / 120

三、设计复用问题 / 121

四、高速数字系统的信号完整性仿真方法 / 122

五、模拟集成电路设计与优化方法 / 123

六、模拟电路物理布局布线方法 / 124

七、纳米尺度器件物理机制模拟仿真 / 125

八、新型存储器的存储与输运模型建模 / 126

九、器件 - 电路 - 系统的协同设计方法学 / 126

第四节 发展建议 / 127

第六章 跨维度异质集成 / 129

第一节 科学意义与战略价值 / 129

第二节 技术现状分析 / 130

一、发展路径 / 130

二、研究现状 / 131

三、国际竞争力评估 / 134

四、发展趋势 / 135

第三节 关键科学问题、技术问题 / 136

一、关键科学问题 / 136

二、关键技术问题 / 139

第四节 发展措施与建议 / 143

第七章 先进封装技术 / 145

第一节 科学意义与战略价值 / 145

一、半导体产业演变与驱动 / 145

二、先进封装技术的演变 / 146

第二节 芯片封装互连技术 / 146

一、芯片封装键合技术 / 146

二、芯片封装底部填充技术 / 150

三、高密度芯片封装键合技术的挑战 / 152

第三节 典型先进封装技术 / 154

一、先进封装技术 / 154

二、WLCSP 技术 / 154

三、2.5D Interposer 封装技术 / 156

四、3D IC 集成封装技术 / 157

五、扇出封装技术 / 158

第四节 先进封装技术总结与思考 / 163

第八章 人工智能理论、器件与芯片 / 165

第一节 技术战略地位 / 165

第二节 理论、器件与芯片的发展历程 / 168

一、人工智能理论与技术 / 168

二、人工智能器件 / 173

三、人工智能芯片 / 180

第三节 发展建议 / 188

第九章 碳基芯片 / 189

第一节 研究背景 / 189

第二节 碳基晶体管 / 190

- 一、碳纳米管无掺杂 CMOS 器件技术 / 190
- 二、碳纳米管晶体管的微缩 / 191
- 三、碳纳米管鳍式场效应晶体管 / 192
- 四、石墨烯基晶体管 / 193

第三节 碳基集成电路及其应用 / 194

- 一、碳纳米管 CPU / 194
- 二、碳纳米管高速电路 / 195
- 三、碳基 3D 集成电路 / 195
- 四、碳基柔性集成电路 / 196
- 五、碳纳米管存储器 / 197
- 六、石墨烯集成电路 / 197

第四节 前景与挑战 / 198

第十章 (超)宽禁带半导体器件和芯片 / 200

第一节 科学意义与战略价值 / 200

第二节 技术现状与发展态势 / 202

- 一、宽禁带半导体发展历程及态势 / 202
- 二、(超)宽禁带半导体发展历程及态势 / 211

第三节 需进一步解决的难题 / 225

- 一、低缺陷、大尺寸(超)宽禁带半导体材料外延生长技术 / 225
- 二、(超)宽禁带半导体高性能器件关键技术 / 226
- 三、(超)宽禁带半导体芯片集成与应用 / 226

第四节 科学问题与发展建议 / 227

- 一、(超)宽禁带半导体材料高质量大尺寸外延生长技术 / 227
- 二、(超)宽禁带半导体微波功率器件设计与工艺技术 / 228
- 三、(超)宽禁带半导体高端电力电子器件设计与制备技术 / 229
- 四、(超)宽禁带半导体固态微波/毫米波芯片设计关键技术 / 230
- 五、(超)宽禁带半导体光电器件与探测器件技术 / 230
- 六、前瞻布局(超)宽禁带半导体新型应用技术 / 231

第十一章 量子芯片 / 232

第一节 战略地位 / 232

第二节 国内外进展 / 234

- 一、国外进展 / 234
- 二、国内进展 / 237

第三节 发展规律与研究特点 / 237

第四节 发展建议 / 239

- 一、加强量子芯片材料研究 / 239
- 二、部署硅基量子比特的构造和调控研究 / 243
- 三、量子比特扩展与集成 / 245
- 四、低温电子学与测控电路研究 / 250

第五节 预期目标 / 253

第十二章 柔性电子芯片 / 255

第一节 科学意义与战略价值 / 255

第二节 前沿领域的形成及其现状 / 256

- 一、国外研究现状 / 257
- 二、国内研究现状 / 258

三、发展趋势 / 258

第三节 关键科学问题与技术发展路线 / 259

一、关键科学和技术问题 / 259

二、发展思路与目标 / 261

第十三章 混合光子集成技术 / 264

第一节 研究范畴和基本内涵 / 265

第二节 研究的重要性 / 268

第三节 国内外发展现状 / 270

第四节 关键技术问题 / 275

第五节 发展建议 / 279

一、建设高标准产学研创新性的混合光子集成平台 / 280

二、建立系统性的项目资助体系,保障混合光子集成的发展 / 280

三、支持光子连接研究,培育混合光电子集成封装技术平台 / 281

第十四章 硅基光电子集成技术 / 282

第一节 战略地位 / 282

第二节 发展规律与研究特点 / 283

第三节 技术现状 / 285

一、国外发展现状 / 286

二、国内发展现状 / 289

第四节 发展建议 / 290

一、硅基发光及光源 / 290

二、硅光波导及器件 / 295

第十五章 微波光子芯片与集成 / 313

第一节 战略地位 / 313

第二节 发展规律与研究特点 / 315

一、面临的主要科学与技术问题 / 315

二、未来发展趋势 / 316

第三节 国内外发展现状 / 317

一、微波光子单元器件发展现状 / 318

二、国外系统与应用发展现状 / 323

三、我国发展现状 / 324

第四节 发展布局建议 / 327

一、单元器件级 / 327

二、集成芯片级 / 328

三、系统与应用 / 329

四、基础技术链条平台能力 / 330

第十六章 光电融合与集成技术 / 331

第一节 技术简述 / 331

一、光电子与微电子的关系 / 332

二、光电子与微电子技术的优势 / 332

三、光电融合的重要内容 / 333

四、研究状况与发展战略 / 334

第二节 集成技术发展历程 / 335

一、微电子技术发展历程及启示 / 335

二、光电子集成技术发展的历程 / 336

三、光电子集成技术的瓶颈与发展趋势 / 337

第三节 光电子集成的关键技术 / 340

- 一、集成材料的特性及制备工艺 / 340
- 二、光电融合建模仿真 / 342
- 三、表征与测试 / 343
- 四、CMOS 工艺兼容的集成芯片技术 / 343
- 五、多功能集成技术 / 346
- 六、光互连存储网络技术 / 350
- 七、硅基光源技术 / 351
- 八、微波光子光电融合技术 / 355

第四节 技术优势分析 / 356

- 一、超大容量光通信芯片与模块集成技术 / 356
- 二、稳时稳相传输技术 / 358
- 三、光电融合与集成技术的优势分析 / 360
- 四、新型光计算技术 / 360
- 五、光电融合显著提升系统性能 / 361

第五节 发展趋势与展望 / 363

第十七章 光子智能芯片技术 / 365

第一节 战略形势研判 / 365

第二节 关键科学问题和重点研究内容 / 367

- 一、关键科学问题 / 367
- 二、重点研究内容 / 369

第三节 国内外发展现状 / 372

- 一、光子神经网络国内外发展现状 / 372
- 二、光子脉冲神经网络国内外发展现状 / 374
- 三、面向光子智能芯片的光电子集成国内外发展现状 / 376

第四节 发展建议 / 377

一、第一阶段发展 / 377

二、第二阶段发展 / 378

三、第三阶段发展 / 378

参考文献 / 380

关键词索引 / 418

绪 论

第一节 科学意义和战略价值

自 1958 年第一个集成电路问世以来，以半导体材料为基础的集成电路芯片技术取得了突飞猛进的发展。集成电路是微电子学的主要研究对象和代表性产品，以集成电路为基础的信息产业已经成为世界第一大产业。集成电路元器件组成的功能芯片可以将外界信息按照指令需求采集、获取并进行一系列的处理和执行。根据不同的应用场景，人们可以选择不同的元器件集成组装成各种应用设备，如用于快速读存信息的固态硬盘主要由非易失性存储元器件构成，照相机的成像部分通过电荷耦合器件（charge-coupled device, CCD）或互补金属氧化物半导体（complementary metal oxide semiconductor, CMOS）来实现图像传感等。面向不同应用的半导体元器件构成的集成电路芯片在过去几十年的发展历程中完全改变了人类的生活方式。信息交互、货币流通、医疗娱乐等逐渐从 20 世纪的实体方式转变成更加虚拟和数字化的方式。由于新冠疫情的暴发，公共卫生标准升高，视频会议和线上沟通成为面对面社交的替代方案，直播和电商购物改变了单一的实体店购物模式，线上

问诊和虚拟游戏逐渐分流了一大部分的面诊患者和肢体运动类游戏用户。可以说，集成电路技术的发展极大地促进了集成电路应用产业的扩大。基于集成电路的应用丰富了信息获取的多样性（听觉、视觉、触觉）、信息存储的综合性（文字、数据、图像、音频、视频）、信息处理的复杂性（大数据、云计算、人工智能）和信息传输的时效性与广域性，开创了全新全面革命的信息时代。

为了实现速度更快、能耗更低、应用更广的芯片功能，在过去的几十年里，产业界一直通过晶体管微缩化来完成这一技术目标（Intel, 2022）。然而，随着集成电路特征尺寸逼近工艺和物理极限，一方面，人们依然沿用以往的技术路线，通过引入极紫外光刻等尖端技术，晶体管尺寸得以进一步按比例微缩化，同时借助三维（3D）集成等技术继续提升集成电路芯片算力；另一方面，随着大数据时代和人工智能时代的到来，人们也开始探索能够满足更高算力、更低能耗需求的新型架构和工艺技术。为满足大数据产业而产生的非冯·诺依曼架构芯片、人工智能产业催生的类脑芯片以及完全颠覆比特概念的量子超算芯片等技术成为集成电路发展的新方向。同时，光电芯片经过长期的技术积累也已经开始在信息产业中广泛应用，尤其是通信产业中的光通信芯片已经成为极其重要且不可或缺的部分。光电芯片的核心技术是利用半导体材料的光电转化能力，即半导体材料可以通过吸收光子而产生电子，也可以通过电子的湮灭而发射光子。相比纯电子芯片，以硅基光电芯片、Ⅲ - V 族半导体光电芯片及柔性光电芯片为代表的光电芯片在信息处理、光学传感和显示方面具有传输处理速度更快、更为灵敏和功耗更低等显著优点。这些核心光电芯片，配合高速驱动、读出、放大和时钟电路等，通过高精度、高可靠性的光电耦合封装技术，形成功能模块或子系统，应用在数据中心、超级计算机、汽车自动驾驶、家用机器人、电信设备等大量既提高国家硬实力，又颠覆性地改变人们生活的民用领域，并最终形成完整的产业链。为了满足信息技术向大容量、低功耗、集成化与智能化方向发展的新需求，多功能材料体系异质集成、光电融合集成和多维度 / 多参量 / 多功能 / 高效率调控及可重构成为光电芯片发展的主流方向。

集成电路与光电芯片技术是信息产业的基石，对提升国家综合实力和保障国家安全具有极为重要的战略意义。在信息技术强国普遍对我国实行严厉

技术封锁和打压的国际环境下，实现我国集成电路与光电芯片自立自强，在关键技术方面重点突破并拥有自主知识产权，实现集成电路产业的自主可控发展是我国当前的重大战略需求。根据世界半导体贸易统计组织统计的数据，2021 年全球半导体市场规模超过 5560 亿美元，同比增长超过 26.2%，达到近十年来最大增幅。我国拥有全球最大的半导体产品消费市场，国内芯片进口额连续 6 年超过 2000 亿美元，2021 年集成电路进口额突破 4000 亿美元，同比增长 23.6%（WSTS，2021）。2014 年，工信部发布了《国家集成电路产业发展推进纲要》，对我国高端集成电路技术发展目标做了明确部署。近些年，我国集成电路产业持续稳步发展。赛迪智库集成电路研究所统计，2021 年，不包括设备材料，我国集成电路产业规模达到 9666 亿元。集成电路出口方面，由于全球产能紧缺，加上我国若干新建产线投产，2021 年我国集成电路出口额超过 1500 亿美元。但是，从技术上来讲，我国面临的形势是复杂和严峻的。我国高端半导体器件、集成电路与光电芯片的进口量仍然很大，自主研发的微电子、光电子器件和芯片核心技术积累仍显不足。在目前技术封锁的国际形势下，我国在集成电路芯片和光电芯片技术方面的滞后已经影响到我国部分产业的安全。2015 年 3 月美国商务部开始对我国采取限制出口措施，2018 年 8 月美国“2018 财年国防授权法案”禁止美国政府机构和承包商使用我国的某些技术，2019 年 5 月美国商务部将我国部分公司列入“管制实体名单”，禁止美国企业向这些公司出售相关技术和产品；之后国外集成电路芯片设计制造商、供应商、电信运营商和金融机构陆续暂停了与进入“管制实体名单”公司的业务合作。集成电路与光电芯片确实是各国高科技产业博弈的重点和焦点，也是高新技术的核心和关键。未来集成电路与光电芯片的发展将直接决定我国的经济命脉，只有掌握集成电路与光电芯片领域的一系列核心技术，迅速提升半导体相关产品的自主研发和生产能力，才能摆脱我国高端器件和芯片受制于人的局面。

第二节 产业发展规律与特点

人类社会在信息化方向的发展，经历了人工时代、机械时代，并最终进入了电子时代。集成电路的迅猛发展正是推动电子时代到来的技术动力，光电芯片也发挥着越来越重要的作用。由于上到国家安防下到民生，电子时代对信息交互的依赖越来越强，因此，一个国家集成电路产业的发达程度，直接决定了其国防实力和国际上的经济地位。只有掌握了先进集成电路工艺的核心技术，才能在电子时代的全球大环境下立于不败之地。因此，集成电路与光电芯片产业，是需要从国家层面全局谋划，并给予资金和政策支持的战略性产业。

集成电路产业历经六十多年的发展，有以下基本特点和发展规律：一是国家战略高度性和市场性共存，是一个国家战略方针和政府意志的高度体现；二是技术和资金投入上需要有持续性；三是产业具有一定的周期波动性；四是产业明显依赖先进技术和应用的导向性。早期的集成电路芯片由于单价昂贵、产能稀缺，主要服务于国防大中型计算机。随着 CMOS 微缩化的推进，芯片封装密度大幅提升，电路设计技术不断更新，集成电路的应用得到大幅普及，逐渐由单一的中小型计算机扩展至各种消费类产品，再发展到当下的移动通信、IoT、人工智能、大数据等各个方面。庞大的市场需求和产业生态链使得集成电路产业成为一个具有重要战略意义的发展方向。此外，集成电路产业的生产链需要多个供应链和技术链的群体协作才能完成，在通过市场贸易实现的协作过程中，任何一种材料、一种设备、一套器件和集成技术都可能成为制约竞争者的手段，如日本的聚酰亚胺、氟化氢、光刻胶，荷兰 ASML 公司的极紫外曝光机、亚 10 nm 以下集成电路工艺技术等。因此，集成电路生产链存在着无数具有战略性特征的关键环节。

参考国外先进晶圆代工厂过去二十多年的技术节点变化，可以了解到尖端的技术应用，如智能手机、第五代移动通信（5th generation mobile

networks, 5G) 技术、人工智能等的芯片主要采用的是 20 nm 以下的技术节点。因此, 国外对于先进工艺生产和供应链中设备材料以及代工限制将极大地制约我国在这些新兴关键技术领域的发展。对于我国当下缺乏集成电路制造关键技术、材料以及设备的现状, 必须凭借新型举国体制的优势, 通过攻坚创新, 打通集成电路技术和产业链壁垒, 建立风险可控的先进集成电路芯片产业链。

集成电路与光电芯片产业的另外一个特点是技术和资金投入巨大且需要持续性投入。只有长年累月的资金和技术投入, 才能保持集成电路企业在技术迭代的洪流中始终领先, 并在利润最高的尖端技术领域实现长期回报。在资金投入方面, 对于台积电、格罗方德这样的代工厂而言, 其主要投资用于建设生产线和工艺开发, 对于英特尔和三星这样的垂直整合制造 (integrated design and manufacture, IDM) 模式企业, 除了上述成本以外, 其部分投资还需要用于产品设计和开发 (魏少军, 2020)。

随着集成电路工艺水平的不断提高, 集成电路生产线建设的投资逐年增加。2012 年, 建设一条 300 mm 硅片、32 nm 技术节点、月产 35 000 片晶圆的生产线, 其工艺加工设备费用为 30 亿美元, 其他配套材料设施费用为 4.6 亿美元, 2.2 万 m² 厂房建设费用为 0.4 亿美元, 合计 35 亿美元。2017 年, 新建一条 7 nm 工艺生产线的费用达到了 54 亿美元。2022 年, 新建一条 3~5 nm 工艺生产线的费用达到 200 亿~250 亿美元。在生产线建成并正常运转的基础上, 为了实现市场竞争力和盈利, 还必须开发技术先进同时产出率高的工艺。成套的集成电路生产线通常包括几百道工艺步骤, 如果每道工艺的良率为 99%, 那么经过几百道工艺后, 产品良率就会下降至不足 50%, 不能满足企业盈利的需求。为此, 要对每道工序进行反复试验和调校, 直至得到最佳工艺参数。这一过程需要投入大量人力和物力, 也是工艺研发成本的主要部分。为了实现企业的长期回报, 技术的持续迭代也需要持续性的研发投入, 可以说, 集成电路产业是需要技术和资金持续投入的行业。

此外, 随着集成电路与光电芯片的封装密度提升, 成本逐渐下降, 加上基于 CMOS 的应用电路设计不断创新, 集成电路与光电芯片的设计、制造与应用的联系更加紧密。芯片将信息获取、处理、存储和传输方面的应用高度集成, 其应用范围分布广泛, 并逐渐改变大众的传统生产生活方式。集成电

路与光电应用芯片服务于卫星制导、新能源汽车、远程医疗、数字金融等国防民生领域，特别是2020年以来的新冠疫情期间，大数据追踪、健康码等的快速应用完全得益于集成电路技术的发展。正因为集成电路产业和市场的紧密联系，其发展受应用市场波动的影响十分明显。根据世界半导体贸易统计组织的数据分析，世界集成电路市场的增长率一直呈周期性的波动状态，表现为每10年左右的增长率呈现一个先下降后上升的波动趋势。出现这个趋势的原因，一是宏观经济的影响，如地区性或全球性的经济危机和经济衰退；二是部分电子信息系统产品的供需饱和导致企业的投入调整。我国过去20年的国内生产总值（gross domestic product, GDP）增长与电子信息制造业增长的速度和规律趋同，而且我国集成电路产业销售额的增速要大于集成电路市场的扩张速度，这说明我国集成电路产业发展和市场扩张密切相关，国产集成电路的比例逐渐增加。

第三节 发展现状与挑战

集成电路在制造方面遵循摩尔定律的预测，即在过去几十年里，一般每两年完成一次CMOS器件面积的成倍微缩。随着器件尺寸从亚微米级逐渐微缩至深亚微米级，技术和资金的投入指数倍地增加。这种数额巨大的投资导致了集成电路的技术研发越来越集中于少数企业。而少数企业的技术领先，会增加其市场占有率和盈利，形成了“投资—盈利”的循环正反馈。

全球拥有130 nm技术节点的企业有26家，28 nm技术节点的企业减少到了10家，16/14 nm技术节点的企业仅有7家。10 nm技术节点阵营中，只有三星、英特尔和台积电这三家企业可以支撑巨额的研发和工艺线建设经费。2020年，三星和英特尔已经分别量产了7 nm和5 nm技术节点产品，3 nm技术节点产品也将进入量产。三星在2020年1月宣布了首款基于极紫外光刻制程和围栅器件结构的3 nm量产工艺芯片。存储芯片作为集成电路芯片的重要部分，已经占据了全球半导体市场的接近三分之一的份额。以

Flash 为代表的传统非挥发性存储器和以铁电存储器、磁阻存储器、相变存储器 (phase change random access memory, PCM)、阻变式存储器 (resistive random access memory, RRAM) 为代表的新型非挥发性存储器继续发展的同时, 2019 年起三星、英特尔、台积电、格罗方德四大集成电路制造企业都实现了自旋电子芯片量产, 未来 3~5 年产能将逐步提高, 加速集成电路的存算融合。

我国集成电路产业的销售额在 2000 年以后呈现指数增加的趋势。根据世界半导体贸易统计组织的数据, 2019 年我国的半导体市场规模为 1446 亿美元, 占世界市场的 35%。2019 年我国拥有 12 in^① 生产线 28 条 (全球 121 条), 8 in 生产线 35 条。

在设计产业方面, 中国是全球第二大集成电路设计业聚集地, 但由于所设计产品多为中低档芯片, 因此中国设计业的产值在全球芯片市场的占比并不高 (10% 左右)。2020 年, 国内市场上, 我国设计的芯片价值仅为国外设计芯片的 40%。因此, 尽管我国设计的整体产值位居世界前列, 但是尖端芯片设计仍然是亟待发展的领域。

相对于半导体集成电路而言, 光电芯片有超高速率、超低功耗等特点。利用光信号进行数据获取、传输、计算、存储和显示的光子芯片具有非常广阔的发展空间和巨大的潜能。目前, 光网络的核心传输和交换设备中, 光电子器件的成本比例分别达到 70% 和 60%。100 Gbit/s 光网络设备中, 光电子器件的成本比例已经超过 80%, 云计算和数据中心已经包含了大量的光收发模块。谷歌公司现在是全球最大的光器件采购商。在消费电子领域, 2017 年苹果公司推出的 iPhone X 搭载以垂直腔表面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 为光源的面部识别模组, 拉开了消费光子时代的序幕。2020 年, 突发的新冠疫情席卷全球, 红外测温设备、投影式红外成像设备、增强现实 /5G 远程会诊系统等光学领域多项技术在抗击新冠疫情的过程中起到了重要作用, 加速了光电芯片的发展。此外, 硅基光电子集成技术还可以应用于硅光人工智能芯片、硅光量子集成芯片等新兴领域, 展示了光电融合的巨大发展潜力。

① 1 in=2.54 cm。

根据法国咨询公司 Yole Développement 的数据，2015 年全球硅光芯片的市场规模不足 4000 万美元，并且拥有相关产品的公司只有思科、英特尔、意法半导体等几家。伴随社交网络、视频和游戏内容的增加，互联网流量不断增加，进一步刺激了硅光芯片、光电收发芯片在数据中心的应用快速增长。预测到 2025 年，全球硅光芯片的市场规模将增长至 15 亿美元，而光电收发芯片的市场规模将达到 40 亿美元。作为光通信系统核心的光电子器件与芯片，其发展关系到新一代信息技术的发展。自 2016 年以来，全球移动数据量年均增长率为 60%，但光电子器件的带宽年均增长率约为 10%。器件带宽的增长难以匹配数据量的增长，矛盾愈发凸显。因此，器件单位信息量的功耗、成本、体积必须大幅度降低，这也是近年来光电子技术面临的主要挑战。为应对未来发展趋势，需要研发大带宽、高速率的光电子器件和多材料、多功能及阵列化的集成光电子器件。另外，智能通信、无人驾驶、智慧城市等新应用场景的涌现对光电子器件的可编程、可调控、可重构提出了需求，需要发展智能化光电芯片。

光电芯片已经在扫描测距、医疗传感以及模拟电子系统等新兴领域显现出巨大的应用潜力。另外，基于硅光子的固态激光雷达就具备极强的竞争力，相比机械型的激光雷达，固态激光雷达可以通过光学相控阵实现光束扫描，而不需要任何移动部件，具备重量和功耗方面的突出优势，在低速无人机、家用和商用机器人等领域有应用优势。法国咨询公司 Yole Développement 预计固态激光雷达每年将有 26% 的增长。

总之，虽然我国拥有全球最大的半导体产品消费市场，但是我国芯片自给率不足，尤其在信息产业领域中的高端半导体器件、集成电路与光电芯片方面，自主可控的高端微电子、光电子器件和芯片资源较为匮乏。国外对我国集成电路与光电芯片产业的技术壁垒限制已经影响了我国相关新兴信息技术产业的发展，并对我国产业安全和国家安全造成了威胁。因此，只有突破和掌握集成电路与光电芯片领域的一系列核心技术，迅速提升半导体相关产品的自主研发和生产能力，才能摆脱当前我国高端器件和芯片的被动局面，从根本上保障我国的产业安全、信息安全和国家安全。

第四节 发展趋势与本书安排

集成电路工业水平和规模是一个国家综合国力的标志，也是大国战略竞争的制高点。目前我国集成电路与光电芯片产业从材料、设备、工艺到设计的电子设计自动化（**electronic design automation, EDA**）工具都面临诸多问题，不能完全支撑国民经济、社会发展、国家信息安全，以及国防装备的快速发展。进入后摩尔时代，虽然硅集成电路制造技术在器件特征尺寸上按比例缩小的进度变缓或终将停止，但是通过新技术的引入，集成电路算力仍将持续提升，继续推动整个信息产业的发展。集成电路相关的关键技术仍然是信息领域最核心的技术，并可能产生更多新的难题。光电芯片向着超高速、集成化与智能化方向发展，以支撑小尺寸、高速率、低功耗、集成化和智能化信息技术的发展。集成电路与光电芯片技术的发展将会带来更多的挑战，未来发展呈现如下趋势。

（1）当前集成电路技术已进入后摩尔时代，如何通过集成电路设计、新型材料和器件的颠覆性创新使芯片的算力按照摩尔定律的速度提升，是后摩尔时代的一个主要技术趋势；自旋、多铁、磁等技术将引起存储芯片的技术变革。

（2）芯片算力正从通用算力向专用算力演化，体系结构的创新正逐渐从通用的优化到专用的创新转变，通过发展满足专用应用场景下的芯片技术（如接近零功耗的电路设计、近似计算、可重构计算、模拟计算、异构计算等），实现算力的大幅提升。

（3）EDA 正面临重要变革机遇，集成电路制程进入纳米尺寸（小于 5 nm）时会产生量子效应，整个晶体管需要用量子力学（如密度泛函、离散傅里叶变换）方法来描述。EDA 的龙头企业新思科技已经提前布局了量子力学工具；同时，芯片设计方法学从传统强调设计质量但设计周期长，变革到重视敏捷性和易用性，通过半年甚至更短的时间完成一个成熟芯片的迭代，

以及人工智能和 EDA 算法的结合，将可能大幅减少人工参与而实现自动生成。

(4) 量子芯片、类脑智能芯片将引起巨大的技术变革，利用集成电路加工技术实现对量子信息的操控，进而实现具有量子信息处理功能的芯片；构造类生物神经网络的半导体器件，制造类脑神经网络结构和信息表达处理机制的芯片和系统，实现类脑感知与认知，是通往通用人工智能的一条重要可行路线，是连通信息科学、脑科学、数理科学的枢纽。

(5) 跨维度异质异构集成和封装技术将实现量子芯片、类脑芯片、3D 存储芯片、多核分布式存算芯片、光电芯片、微波功率芯片等与通用计算芯片的巨集成，彻底解决通用和专用芯片技术向前发展的功耗瓶颈、算力瓶颈并实现其功能拓展。

(6) 面向低功耗、小尺寸、IoT/5G/6G 的需求，发展光电子与微电子融合及混合集成技术；突破集成光电子的物理与材料局限的异质异构光电子集成和 3D 集成技术，发挥光电子与微电子技术各自的优势，提升光电芯片的性能，增强光电子-微电子集成器件的信息感知和信息处理能力。

(7) 发展智能光子信号处理技术，在光域实现超宽带、超高速与智能化信号处理技术，包括可编程光子集成芯片、传输与运算相融合的处理芯片、光神经网络芯片等技术。

(8) 发展全频谱阵列集成技术，满足复杂业务和通信带宽需求，频谱涵盖微波到红外乃至太赫兹的范围。

(9) 发展柔性光电子技术，将光电子器件制作在柔性 / 可延展基板上，满足更多新型应用的需求，如柔性光显示、增强现实 / 虚拟现实 (augmented reality/virtual reality, AR/VR) 与光感知等。

在“十五”到“十三五”期间，我国通过国家高技术研究发展计划（简称 863 计划）、国家重点基础研究发展计划（简称 973 计划）、国家重点研发计划、国家重大科技专项、国家自然科学基金等科技项目在集成电路与光电子技术研究方面逐步加大了投入：一是基础研究水平突飞猛进，一批有自主知识产权的新材料、新器件、新结构成果和关键技术处于国际领先地位；二是制造工艺取得长足进步，以中芯国际、长江存储、弘芯半导体等为代表的制造企业具备了较强的芯片加工能力和研发能力；三是以华为、紫光、寒武纪、海光、龙芯等为代表的芯片设计公司开始在世界市场上掌握一定的话语