

引用格式: 须江, 张薇. 数字经济的基石: 芯片技术的“危”与“机”. 中国科学院院刊, 2024, 39(9): 1612-1618, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240715001.

Xu J, Zhang W. Cornerstone of digital economy: Challenges and opportunities of IC technologies. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(9): 1612-1618, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240715001. (in Chinese)

数字经济的基石: 芯片技术的“危”与“机”

须江^{1*} 张薇²

1 香港科技大学(广州) 广州 511453

2 香港科技大学 香港 999077

摘要 作为信息时代数字经济的基石, 芯片的本质是利用物理现象来代表并处理信息。中国不仅在芯片制造领域面临“卡脖子”的挑战, 在集成电路设计自动化(EDA)工具和相关人才培养领域也面临非常严峻的形势。文章在回顾芯片技术的背景和现状的基础上, 分析了粤港澳大湾区的优势、需要关注的问题和潜在的技术突破领域。

关键词 芯片, 集成电路, 电子设计自动化, 数字经济, 人才培养

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240715001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240715001

1 芯片是数字经济的基石

人类社会已经历了3个时代性的发展阶段——农业时代、工业时代和信息时代, 首先建立了人类群体生存和温饱的基础, 进而拓展了人类的群体能力, 现阶段人类的群体智慧正在快速增长。信息时代, 大量经济活动都是基于信息开展的。对信息进行收集、转化、存储、保护、处理、发送、接收和分享都是信息

时代的基本活动。数字是表达信息的主要方式, 因此信息时代的主要经济活动被称为数字经济。当前, 在数字经济领域, 中国的发展仅次于美国。例如, 美国有Alphabet(字母表)、Meta(元)和Amazon(亚马逊)等世界知名信息企业, 中国也有阿里巴巴、腾讯和百度等从事信息产业相关世界级企业。

数字经济需要处理大量的信息, 依靠人力是远远不够的; 以计算机为代表的信息系统逐渐取代人, 更

*通信作者

修改稿收到日期: 2024年9月4日

加有效地处理各种信息数据。最古老的计算机是基于经典物理原理的机械式计算机，而中国的算盘是最古老的机械式计算机之一。第二次世界大战时期，由于战争的需要和电子技术发展，机械式计算机逐步向电子计算机发展。

电子计算机经历了4个发展阶段——大型机、小型机、个人计算机（PC）和嵌入式计算机。^① **大型机**。作为二战后的一个重要的技术，电子计算机首先被大型企业采用，出现了大型机。大型机的体积较大，但它的可靠性使其在金融和政务系统发挥着重要作用。^② **小型机**。20世纪70年代，由于半导体技术的发展，开始出现了小型机，它可以把原来需要一个房间的设备缩小到一个机柜之内。小型机可以支持多人同时使用，价格也相对于大型机便宜了很多，使其更加普及。^③ **个人计算机**。20世纪80年代，随着集成电路技术的飞跃性发展，个人计算机可以进入每个人的生活。^④ **嵌入式计算机**。2000年前后，随着片上系统（SoC）芯片技术的发展，带来了一个根本性的变化——计算机变得越来越小，并逐渐地嵌入到各种物体之中，演变为嵌入式计算机，也被称为嵌入式系统。SoC技术可以把一台计算机的绝大部分功能集成在一颗小小的芯片之上，而且在实现更多功能的同时，大幅降低成本和功耗。嵌入式计算机的使用对象已经不再仅仅局限于人，而是任何物品。它可以使物体变得智能化，让人与人、人与物和物与物之间沟通信息，形成物联网（IoT）。由此可见，数字经济所依赖的计算机，无处不在的信息化和智能化，都依赖于芯片技术这一基石。

芯片是计算机的核心部件，没有芯片就没有计算

机，数字经济也就无从谈起。相较于其他经济模式，数字经济使中国能够更加有效地利用自然资源和人力资源，同时降低对环境的负面影响，让14亿中国人全面富裕起来。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》（以下简称“‘十四五’规划”）指出，集成电路（芯片）是“事关国家安全和全局的基础核心领域”之一，将其上升到国家安全的高度。因为没有芯片就没有数字经济，没有数字经济，中国的复兴之路将更加艰辛。芯片是中国经济发展的关键因素，这个道理我们清楚，美国也清楚。为了维护其领先地位，美国开始限制中国的芯片技术发展。2022年8月，美国出台《2022年美国芯片与科学法案》，全面禁止向中国出口高端芯片和技术。2022年10月，美国正式禁止其公民和绿卡持有者参与中国高端芯片发展^①。美国还拉拢日本、韩国、中国台湾组成CHIP4联盟，构建对华芯片封锁。2023年1月，美国迫使日本和荷兰开始禁止对华出口先进芯片设备^②。

2 芯片技术的“卡脖子”现状

2.1 中国和世界各国都对芯片有旺盛的需求

作为信息时代的数字经济的基石，芯片需求长期保持高速增长的势头。在过去20多年间，世界芯片市场的平均年复合增长率（CAGR）达到6.0%^③。而且，这个高速增长态势非常稳定，即便是2008年世界金融危机和2019年全球新冠疫情，芯片需求的增速在短暂回落之后，很快又强劲地反弹。全球经济都在逐渐向数字化转型，而芯片是支持数字经济的必需品，是信息社会的基础，这是世界芯片市场持续高速增长的根

^① Implementation of Additional Export Controls. (2022-10-13)[2024-09-10]. <https://www.federalregister.gov/documents/2022/10/13/2022-21658/implementation-of-additional-export-controls-certain-advanced-computing-and-semiconductor>.

^② Koc C, Leonard J. Biden wins deal with Netherlands, Japan on China chip export limit. (2023-01-27)[2024-09-10]. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-27/biden-wins-deal-with-dutch-japan-on-china-chip-export-controls>.

^③ 数据来源：World Semiconductor Trade Statistics(<https://www.wsts.org/>)。

本原因。

自2013年起，集成电路一直是中国进口金额最大的商品，仅2023年中国就进口了价值约2.46万亿元的芯片^④。不仅如此，中国是目前世界上最大的芯片市场，自2015年起中国每年购买了超过全球1/4的芯片^⑤。中国是制造业大国，进口的芯片被用于制造各类商品，又通过出口贸易以其他形式销售到世界各地，但仍然有大量芯片在中国实际使用。芯片主要用在哪些领域呢？根据2023年的数据显示，全球约32%的芯片用在如手机基站、交换机等通信系统中，接下来依次是应用于计算机系统约为25%、汽车约为17%、工业系统约为14%、消费电子约为11%及政府采购约为1%^⑥。由于需要大量使用芯片，世界级的通信设备企业往往也是大型芯片设计企业，如中国华为和美国高通（Qualcomm）等公司。

2.2 中国的芯片被“卡脖子”的3个方面

现阶段常说的中国芯片被“卡脖子”，具体是指3个方面：先进芯片制造设备和工艺、芯片设计和集成电路设计自动化（EDA）工具、芯片人才。中国在芯片制造设备和工艺等方面的进展已经被广泛讨论和关注，在一些领域进步较快。相比之下后两者面临的挑战也非常大。

在芯片设计方面，全球设计芯片最多的是美国企业，2023年约占全球份额的50%，其次是韩国约14%、欧盟约13%、日本约9%和中国台湾地区约7%，中国仅设计和销售了全球约7%的芯片^⑦。前面提到的

CHIP4联盟占了全球芯片设计销售市场份额的80%左右，也是其“卡”中国“脖子”的基础。中国企业目前设计和销售的大部分是中低端芯片，而高端芯片被美国企业牢牢控制^⑧；在人工智能算力芯片领域，美国企业如英伟达（NVIDIA）、英特尔（Intel）和超威半导体（AMD）等公司在世界上处于垄断地位。

芯片设计离不开EDA工具。EDA工具的核心是对芯片理论和实践经验的总结，它以软件的形式提供给用户使用。全球最大的4家EDA公司，分别是美国的新思科技（Synopsys）、铿腾电子（Cadence）、Ansys和德国的西门子EDA（Siemens EDA），他们几乎垄断了全球的EDA市场。其中西门子EDA的前身是美国公司Mentor Graphics。如果限制中国使用这4家公司的EDA工具，那么就会对中国的芯片设计构成非常大的障碍。2022年3月美国商务部长就曾放言，只要美国不提供EDA工具，中国芯片企业就得停产^⑦。2022年8月，美国政府开始禁止任何美国公司向中国出口任何支持使用全环绕栅极（GAA）晶体管设计高端芯片的EDA工具^⑧。由于全球的芯片制造企业从3nm或2nm工艺节点开始转向GAA晶体管技术，实质上这一限制把中国企业全面排除在2nm和更先进的芯片工艺之外，其冲击将在接下来的几年逐渐显现出来。

作为集成电路产业必不可少的核心关键领域，“十四五”规划已经把EDA工具列为集成电路方向中首要攻关目标。虽然发展EDA工具是解决芯片“卡脖

④ 2023年12月全国进口重点商品量值表(人民币). (2024-01-12)[2024-07-20]. <http://gdfs.customs.gov.cn/customs/302249/zfxgk/2799825/302274/302275/5624360/index.html>.

⑤ 数据来源: Statista (<https://www.statista.com/>).

⑥ 数据来源: Semiconductor Industry Association (<https://www.semiconductors.org/>).

⑦ Shalal A. U.S. will ‘absolutely’ hit Chinese firms if they violate export controls on Russia, says Raimondo. (2023-03-24)[2024-07-20]. <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/us-will-absolutely-hit-chinese-firms-if-they-violate-export-controls-russia-says-2022-03-23/>.

⑧ Yang Z Y, Inside the software that will become the next battle front in US-China chip war. (2022-08-18)[2024-07-20]. <https://www.technologyreview.com/2022/08/18/1058116/eda-software-us-china-chip-war/>.

子”的重点，但困难重重。除了产业起步较晚的客观因素之外，研发投入不足和人才短缺是中国目前急需补上的短板。芯片是高技术产业，在研发方面需要巨大的投入。根据2022年的数据显示，美国芯片行业的平均研发投入占销售收入的比例是19.5%，而中国芯片行业的这一平均比例只有7.6%^[2]。这里有个例外，华为一直在进行大量的研发投入，例如2023年约占销售收入的23%，这是与美国头部芯片公司的投入比例相当。华为能够在芯片领域经得起美国的打压，其中很重要的原因在于它确实有实质性的研发投入和产出。

芯片人才短缺是芯片“卡脖子”的核心难题，严重限制了我国自主EDA工具和芯片设计与制造技术的进步。据估计，2024年中国将缺少约22万名芯片类的人才^[3]。由于芯片产业的高速发展，加之世界各国普遍开始重视芯片供应链安全，美国、欧洲、日本、韩国和中国台湾地区都出现了大量的芯片人才短缺问题。2022年美国出台的《2022年美国芯片与科学法案》和2023年欧盟的《欧洲芯片法案》以立法的形式确定了芯片人才培养的要求。中国早在2016年就出台了《教育部等七部门关于加强集成电路人才培养的意见》及一系列相关的政策。

在芯片领域，目前我国高校不仅培养人才所必需的教师数量不够，工作收入也不如产业界有吸引力，从而限制了芯片核心课程开设的数量和质量，进而影响了培育芯片人才的速度和人才质量。欧美发达国家在教育、科研、薪酬和工作环境方面普遍具有优势。因此，许多中国学生会选择出国继续深造，最终留在发达国家工作，而这进一步减少了国内芯片人才的数量。通过人才政策，从国外引进优秀教师到高校任教可以部分地补充师资力量的缺口。目前，中国高校中

各个层次的人才认定条件重视科研和文章，而忽视老师的教育作用，这背离了高校培育人才的根本责任。

3 芯片技术的挑战和机遇

3.1 芯片技术复杂、要求严苛、投资巨大

芯片技术是一个非常复杂的体系，尤其是高端芯片技术，它几乎涵盖了现代科技的所有门类，是一门高度交叉的学科，也是对现代科技的综合检验，因此芯片也被誉为现代科技“皇冠上的明珠”。芯片的制造分为三大部分：设计、加工和测试。芯片的主要材料是硅，也是地球上第二丰富的元素，在自然界的常见存在形式是沙子。芯片的价格经常比同等重量的黄金还要昂贵，因此有人把芯片技术称为“现代炼金术”。人工智能算力芯片等现代高端芯片往往是由数十亿个纳米尺度的晶体管构成，这些晶体管再通过数百亿根金属线连接起来，其工程规模与复杂程度远超人类历史上所建造的任何其他物品或工程，因此技术挑战非常大。目前，世界上最复杂的芯片是由美国Cerebras Systems公司制造的第三代人工智能芯片WSE-3^⑨，该芯片拥有大约4万亿个晶体管。银河系中大约有1 000亿颗恒星^⑩，而WSE-3芯片拥有的晶体管数量是银河系中的恒星数量的几十倍。

芯片主要分为四大类别：逻辑芯片、存储芯片、模拟芯片和其他芯片。① 逻辑芯片。用量最多的芯片。比如，计算机的中央处理器（CPU）和人工智能算力芯片中的图形处理器（GPU）都属于逻辑芯片。逻辑芯片中重要的类型还有专用集成电路（ASIC）、现场可编程逻辑门阵列（FPGA）和数字信号处理器（DSP），后两者在通信和雷达等领域应用广泛。② 存储芯片。U盘（USB闪存盘）、计算机内存和固态硬盘中都大量使用存储芯片。目前，世界存储芯片的市场

⑨ 数据来源：Cerebras(<https://cerebras.ai/product-chip/>)。

⑩ Howell E, Harvey A. How many stars are in the universe? (2022-2-12)[2024-7-20]. <https://www.space.com/26078-how-many-stars-are-there.html>.

规模约为逻辑芯片的一半。^③ **模拟芯片**。例如，在电动汽车中对电池的充电、放电，以及驱动电机用的功率芯片、无线通信系统中的射频芯片都属于模拟芯片。现代高端芯片采用片上系统芯片（System-on-Chip, SoC）技术把多种芯片类型整合在一起。因为片上系统芯片技术复杂和集成程度更高，是目前世界上最难制造的芯片。华为和苹果手机中使用的核心芯片就是片上系统芯片。

芯片要达到商业上的成功，需要满足7个方面的要求，这些要求可以用“PERFECT”（完美）这个词来概括：Performance（高性能）、Energy efficiency（高能效）、Reliability（高可靠）、Functionality（多功能）、Extensibility（可扩展）、Cost（低成本）和 Testability（易测试）。商业可行的芯片需要“完美”，同时满足这7个条件，这是非常困难的。芯片的“完美”，不仅是一个复杂的工程，更需要依靠不断推进的科技进步来实现。芯片的发展经历了多个阶段，从最初的集成电路到超大规模集成电路，再到特大规模集成电路，发展速度之快让人咋舌，词汇已经无法描述其规模之大，最终将其统称为大规模集成电路。

从20世纪60年代开始的很长时间以来，芯片的发展遵循着“摩尔定律”^[4]——芯片上的晶体管数量大约每1—2年增长1倍，而随着晶体管数量的增加，芯片的功能也得到了增强。这种指数级的增长产生了巨大的技术冲击，打开了数字经济的大门。“摩尔定律”是对半导体产业的观察，本质上是一种经济现象；在现实世界中，任何指数级的增长都是不可持续的。例如，设计65 nm的芯片，整体研发费用的开支约为2 800万美元，7 nm工艺高端芯片的整体研发费用约为3亿美元，5 nm工艺高端芯片的整体研发费用

则快速增长到约5.4亿美元。建设芯片制造工厂的费用也在快速增长，约4亿美元可以建造一个生产65 nm芯片的工厂，但若是要建设生产5 nm的芯片工厂，投资费用达到54亿美元^①。据估计，建设生产2 nm芯片的工厂，投资额将超过280亿美元^②。芯片工艺越先进，所需要的研发费用和工厂建设投入越高；如此高昂的投资迫使大家都在积极寻找出路，为未来20—30年“摩尔定律”的终结做准备。

3.2 中国需要尽快布局光电融合芯片

对于中国而言，“摩尔定律”已经被人为地按下了暂停键。美国及其盟友对中国进口芯片制造设备和EDA工具的严苛限制是中国面临的巨大挑战，但也同时蕴含着巨大的机会。1947年，John Bardeen、Walter Brattain和William Shockley在美国贝尔实验室发明了晶体管；1958年在美国德州仪器公司（TI），一位刚入职的员工Jack Kilby发明了集成电路——他们后来都获得了诺贝尔奖。虽然经过70多年的高速发展，相较于其他学科和产业，芯片还是一个非常年轻的领域，有大量的新技术、新方法和新理论需要被探索，许多工业实践正待优化。

芯片的本质是利用物理现象来代表并且处理信息，而现代芯片仅利用了电子学原理，其他已知的可以用于芯片的物理现象包括：光子、量子效应、分子和生物。目前，全球主要的芯片企业都不约而同地投资和研发基于光子和电子的光电融合芯片（简称“光芯片”），将其作为超越“摩尔定律”的下一代芯片技术。例如，英特尔（Intel）公司在2023年展示了拥有光接口的CPU芯片原型。光电融合芯片可以使用现有的成熟工艺生产，其性能的提升主要依靠光子和电子的互动和互补技术。研究表明，光电融合芯片可以

^① Semiconductor design and manufacturing: Achieving leading-edge capabilities. (2020-08-20)[2024-09-10]. <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/semiconductor-design-and-manufacturing-achieving-leading-edge-capabilities/>.

^② 数据来源: International Business Strategies (<https://www.ibs-inc.net/>)。

比现有的电基高端芯片的性能提高近3倍，并且能效提高近5倍^[5]。目前，国外公司由于拥有电基芯片技术，在一定时间内仍具有投资和成本惯性和先发优势。而中国受制于美国，电基芯片的发展已经遇到了瓶颈，应该尽快布局光电融合芯片这一新兴技术领域，化被动为主动。同时，光电融合芯片技术也是实现量子芯片的主要途径。光电融合芯片将是中国芯片产业发展的新方向，也会带来世界领先的创新和突破。

3.3 粤港澳大湾区的独特地位和作用

20世纪60年代，香港的芯片产业开始起步，并逐渐成为中国最早的芯片制造中心，香港科技大学也曾是中国唯一、世界上为数不多的拥有科研芯片加工中心的大学。随着经济转型，香港芯片产业已经今非昔比，但是香港在芯片的高等教育和科学研究领域始终保持着与欧美发达国家相同的水准。香港和澳门一直是中国改革开放的对外“桥梁”，与世界保持着紧密联系。随着粤港澳大湾区工作的推进，这座改革开放的“大桥”可以更好地服务国家。广州南沙、深圳前海和珠海横琴等地区纷纷推出具体政策促进粤港澳在芯片领域合作。香港和澳门的多所大学开始在广东

办学，在吸引大批海外人才回国的同时，与广东共同培养急需的芯片人才和进行科研创新。

参考文献

- 1 Palma R, Varadarajan R, Goodrich J, et al. The Growing Challenge of Semiconductor Design Leadership. (2022-11-30) [2024-07-20]. <https://www.bcg.com/publications/2022/the-challenges-of-semiconductor-design-space>.
- 2 Grassano N, Hernandez Guevara H, Fako P, et al. The 2022 EU Industrial R&D Investment Scoreboard. (2022-12-13) [2024-07-20]. <https://iri.jrc.ec.europa.eu/scoreboard/2022-eu-industrial-rd-investment-scoreboard>.
- 3 中国电子信息产业发展研究院. 中国集成电路产业人才发展报告. 北京: 中国电子信息产业发展研究院, 2022. China Electronic Information Industry Development Research Institute. China Integrated Circuit Industry Talent Development Report. Beijing: China Electronic Information Industry Development Research Institute, 2022. (in Chinese)
- 4 Moore G. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 1965, 38(8): 114-117.
- 5 Wang Z H, Wang Z F, Xu J, et al. CAMON: Low-cost silicon photonic chiplet for manycore processors. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2020, 39(9): 1820-1833.

Cornerstone of digital economy: Challenges and opportunities of IC technologies

XU Jiang^{1*} ZHANG Wei²

(1 The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou 511453, China;

2 The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China)

Abstract As the cornerstone of the digital economy in the information age, the essence of integrated circuit (IC) chips is to represent and process information by using physical phenomena. The IC challenges faced by China are not only in the field of fabrication, but also in the fields of electronics design automation (EDA) and talent training. Based on a review of the background and current situations of IC technologies, this study analyzes advantages, issues that need attention, and potential areas of technological breakthrough in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

Keywords chip, integrated circuit (IC), electronics design automation (EDA), digital economy, talent training

须江 香港科技大学(广州)终身教授、微电子学域创始主任,广东省集成电路产教融合协同创新平台负责人。曾在美国贝尔实验室任职。主要从事集成电路研究。E-mail: jiang.xu@hkust-gz.edu.cn

XU Jiang Tenured Professor of the Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Founding Head of Microelectronics Thrust at the Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), and in charge of the Provincial IC Innovation Platform of Guangdong. He used to work at Bell Labs. His research focuses on integrated circuits. E-mail: jiang.xu@hkust-gz.edu.cn

■责任编辑:岳凌生

*Corresponding author