

引用格式: 骆军委, 李树深. 加强半导体基础能力建设 点亮半导体自立自强发展的“灯塔”. 中国科学院院刊, 2023, 38(2): 187-192, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230130001.

Luo J W, Li S S. Strengthen the building of basic reach capacity for semiconductor research to light up the “beacon” towards realizing the self-reliance and self-improvement of semiconductors. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 187-192, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230130001. (in Chinese)

加强半导体基础能力建设 点亮半导体自立自强发展的“灯塔”

骆军委 李树深*

中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083

在“逆全球化”下产业链“脱钩”愈演愈烈的背景下, 当前我国的科技基础能力难以支撑实现高水平科技自立自强的国家战略需求。为此, 在党的二十大报告中提出了加强科技基础能力建设。中国科学院院长、党组书记侯建国在《人民日报》撰文指出, 科技基础既包括各类科技创新组织、科研设施平台、科学数据和文献期刊等“硬条件”, 也包括科技政策与制度法规、创新文化等“软环境”。中国科学院在2022年制定了“基础研究十条”, 明确中国科学院基础研究的战略定位、重点布局和发展目标, 从选题机制、组织模式、条件支撑、人才队伍、评价制度、国际合作等方面提出了一系列有针对性、可操作的政策措施, 强调了学风、作风和学术生态建设。

中美科技战暴露了我国半导体关键核心技术被“卡脖子”的难题。2018年美国制裁中兴事件以来, 全民都在讨论半导体“卡脖子”问题, 从党和国家领

导人到普通百姓一致认为必须大力发展半导体科技。特别是, 习近平总书记在2020年科学家座谈会上指出: “我国面临的很多‘卡脖子’技术问题, 根子是基础理论研究跟不上, 源头和底层的東西没有搞清楚。”虽然半导体基础研究在过去几年受到了很大重视, 但是包括学科设置、协同创新、基础设施、研发投入、评价机制、研究生名额等半导体基础能力并没有得到根本性改善, 难以支撑半导体产业的高水平自立自强发展。

1 加强半导体基础能力建设具有重大战略意义

半导体是当前中美科技战的“主战场”。半导体产品涵盖了上千款芯片和近10万种分立器件, 全球年产值在6000亿美元左右, 并且支撑了下游年产值几万亿美元的各种电子产品和系统, 以及年产值几十亿美元的软件、互联网、物联网、大数据等数字经济。

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20230130001

* 通信作者

资助项目: 国家自然科学基金 (L2224025、11925407)

修改稿收到日期: 2023年2月2日

据统计，1美元半导体产品拉动了全球100美元的国内生产总值（GDP）。半导体技术被认为是国民经济和社会发展的“卡脖子”关键核心技术。

半导体产业链长且范围广：上游包括EDA（电子设计自动化）软件/IP（知识产权）模块、半导体设备和材料；中游是芯片设计、制造、封装和测试；下游是各类电子产品，涉及大量材料、化学试剂、特种气体、设备和配件、软件和IP模块。中国科学院院士王阳元指出，半导体产业链上游的任何一种材料、一种设备甚至一个配件都可能成为制约竞争者的手段。例如，2019年日本限制向韩国出口“氟聚酰亚胺”“光刻胶”和“高纯度氟化氢”3种半导体工艺材料，卡住了韩国半导体行业的“脖子”；最终，在美国的协调下该问题才得以解决。即使半导体的发源地美国也不可能独立解决整个半导体产业链。为此，美国急于拉拢日本、韩国和中国台湾地区组建半导体四方联盟（Chip4），提升其半导体供应链安全，同时遏制我国发展高端芯片产业，企图将我国排挤出全球半导体供应链，以实现美国的半导体霸权。

2022年8月11日美国宣布对我国禁运下一代GAA（全环栅）晶体管的EDA软件，意图阻止我国参与包括芯片设计在内的下一代半导体技术全产业链的竞争，把我国的半导体产业“锁死”在当前的FinFET（鳍式场效应晶体管）技术。全球半导体物理和微电子领域的基础研究成果都被整合在EDA工具的工艺设计套件（PDK）中。目前，我国各芯片企业可以通过购买三大EDA公司的PDK包共享全球半导体基础研究的成果，这导致我国决策者、政府人员甚至产业界都认为，没有半导体基础研究也可以发展半导体产业。如今，美国已经拧熄了“灯塔”，我们进入“黑暗森林”。

半导体物理是一切半导体技术的源头。第一次量子革命揭示了量子力学的基本原理，诞生了激光器和晶体管等器件，产生了包括集成电路、光电子器件、

传感器、分立器件在内的半导体信息技术，半导体领域的11项成果获得了9个诺贝尔物理学奖。当前，2纳米半导体工艺节点即将实现量产，CMOS（互补金属氧化物半导体）晶体管已接近物理极限，“摩尔定律”即将失效。进入“后摩尔时代”的半导体技术已经从原先单纯追求器件尺寸微缩提升集成密度，扩展到同时追求功能性集成；技术路线按照“延续摩尔”（More Moore）、“扩展摩尔”（More Than Moore）和“超越摩尔”（Beyond Moore）3个不同维度继续演进，急需发展突破CMOS器件性能瓶颈的新材料、新结构、新理论、新器件和新电路，面临众多“没有已知解决方案”的基本物理问题挑战。

目前，我国的半导体制造落后国际先进水平两代以上。在中美科技战和产业链“脱钩”的背景下，我国即使设计或制造出先进芯片也难以打入国际供应链。通过大量投资进行国产化替代，只能实现内循环或拉近与美国的差距，仍然无法改变“我中有你、你中无我”的“卡脖子”困境。习近平总书记已经多次指出加强基础研究解决“卡脖子”难题的战略方针。当前，绝大部分高端芯片都使用了相同的FinFET晶体管制造技术；FinFET晶体管至今共有上万件专利，包括发明FinFET晶体管在内的部分核心专利来自半导体物理基础研究成果，而且这些成果不依赖EUV（极紫外辐射）光刻机等最先进的半导体制造设备。通过大力加强半导体基础研究，围绕下一代晶体管的材料、器件、工艺等在欧洲和美国布局大量专利，就可以在芯片制造这个全球半导体产业链的“咽喉”部位设置“关卡”，形成反制手段，有望解决半导体关键核心技术“卡脖子”难题。

2 美国正在加强半导体基础研究能力

2.1 加大半导体人才的培养和引进

在“美国的未来取决于半导体”的口号下，美国在2022年通过了投资2800亿美元的《芯片与科学

法案》，其中仅有390亿美元用于补贴芯片制造，其余则主要用于研究与创新，包括：110亿美元用于建立美国国家半导体技术中心，美国国家科学基金会（810亿美元）、商务部（110亿美元）、国家标准和技术研究院（100亿）、能源部（679亿美元）等机构未来5年共新增1699亿美元经费。《芯片与科学法案》计划向美国小学、初中、高中、本科和研究生普及微电子学及相关领域的知识，立项给予美国下一代以工作为基础的学习项目。

十年树木，百年树人，半导体从娃娃抓起。20世纪60—90年代是半导体大发展的时期，世界各知名大学都拥有规模庞大的半导体领域教授队伍；进入21世纪这批教授逐渐退休，而新聘教授主要从事新兴方向，半导体基础研究逐渐衰落，相关研究转移到半导体企业研究机构。2800亿美元的《芯片与科学法案》将极大改变这一现状，美国高校势必将重新招聘大量半导体领域的教授，吸引更多大量的研究生和博士后前往美国从事半导体基础研究，将为“后摩尔时代”半导体技术的源头创新注入强大活力。

2.2 国家实验室转向“后摩尔时代”半导体创新

报告显示美国能源部从《芯片与科学法案》获得的679亿美元将主要用于“后摩尔时代”半导体技术攻关。早在2016年，美国能源部8个国家实验室就在桑迪亚国家实验室举行了“后摩尔时代”半导体技术的研讨会，评估美国国家实验室大科学设施对微电子研究的支撑能力，提出从材料、器件一直到系统架构和软件的“后摩尔时代”新计算范式的颠覆性创新。劳伦斯伯克利国家实验室更是在2018年进行重组，“超越摩尔”是4个研究方向中的一个，提出了从半导体材料物理、结物理、器件物理、电路到系统的深度协同设计创新框架。

美国通过《芯片与科学法案》投资110亿美元成立国家半导体技术中心，跨部门、跨行业整合美国半导体行业力量，推动半导体创新链中材料、结构、器

件、电路、架构、算法、软件、应用、木马安全、测试和封装等所有环节的集体全栈创新，帮助美国大学和国家实验室更多的突破性半导体技术跨越“死亡谷”，实现美国创新转化为美国增长。

3 我国半导体基础研究能力建设所面临的困境

1978年召开的全国科学大会号召向科学技术现代化进军，我国科技工作经过“文化大革命”十年内乱后终于迎来了“科学的春天”。然而，当时我国与西方发达国家在技术设备上已经形成代差，我国企业无法为基础研究“出题”；基础研究在追赶世界科技前沿的过程中只能脱离国内产业发展的实际需求。加入世界贸易组织（WTO）后，“科学无国界”和“全球化”理念深入人心；从“211工程”“985工程”到如今的“双一流”建设不断强化论文为纲、以刊评文的评价机制，忽视了学科方向和研究领域的差异，科研资源向易发表高端论文的新兴热点方向加速集聚，越是靠近产业应用的基础研究越没人做。

3.1 半导体物理人才严重短缺

我国第一次向半导体进军始于1956年，我国固体物理学和半导体物理学奠基人黄昆建议和组织实施了“五校联合半导体物理专门化”，北京大学、复旦大学、东北人民大学（现“吉林大学”）、厦门大学和南京大学5所大学的物理系大四学生和相关老师集中在北京大学进修培训；两年间共培养了300多名我国第一代半导体专门人才。然而，由于教育部在1997年取消半导体物理与器件专业后至今没有恢复，67年后的今天，我国半导体基础研究人才凋零，从事半导体理论研究的人员屈指可数。没有庞大的半导体物理研究队伍，就难以实现半导体技术源头和底层的自主创新，在美国的封锁下我国半导体产业的发展将成空中楼阁。

3.2 半导体基础研究投入严重不足

美国长期以来在半导体领域投入巨额研发资金，

超过全球其他国家总和的2倍。早在1978年，美国联邦政府投入半导体的研发经费就达到10亿美元，企业投入为4亿美元。2018年，美国联邦政府投入增加到每年60亿美元，而半导体企业投入则高达400亿美元，这接近我国中央财政3738亿元人民币的科技研发总支出。以我国的国家自然科学基金委员会2019年的资助为例，资助半导体基础研究的半导体科学与信息器件（3.84亿元人民币）、光学和光电子学（5.51亿元人民币）2个处的经费仅占330亿元人民币总经费的2.8%；包括科学技术部的01、02、03重大专项和半导体领域的重点专项，我国的半导体研发投入长期不足美国的5%。

美国除拥有数量众多的世界一流大学外，还有数量不少的国家实验室作为其基础研究的“压舱石”；此外，美国各大半导体巨头拥有庞大的基础研究部门，如贝尔实验室和IBM实验室等。而我国半导体基础研究领域的研究基地数量稀少，半导体超晶格国家重点实验室是唯一以半导体基础物理为研究领域的国家重点实验室；在已经成立的国家实验室中，从事半导体基础研究的人员也非常少；至今没有建设服务半导体基础研究的大科学装置；我国半导体企业还停留在国产化替代阶段，没有能力兼顾基础研究。

3.3 评价机制不利于半导体基础研究

十八大以来，党和国家领导人非常重视基础研究，国家出台了加强基础研究和破“四唯”的一系列文件。但是，由于产业与科研的脱节，以论文为纲的惯性在短期内难以扭转。2022年公布的第二轮“双一流”建设名单中，全国有30所以上高校的材料专业入选“双一流”建设，化学22所，物理学8所，集成电路科学1所；与此同时，半导体却连学科也没有。在半导体领域，2014年国家启动示范性微电子学院建设，至今共28所高校设立了微电子学院；2020年设立集成电路科学与工程一级学科。硅和砷化镓等传统半导体的基础研究不但投入大、门槛高、周期长而且难

以发表高端论文；在忽视学科方向和研究领域差异的评价机制作用下，传统半导体难以入选各类人才项目且投入产出比低，无法成为各高校的重点发展对象，这导致各示范性微电子学院集中在新兴热点材料方向开展“换道超车”研究。

3.4 缺乏协同创新机制

日本在1976年通过“超大规模集成电路联盟”（VLSI）组织集成电路攻关，帮助日本在1986年半导体市场份额超过美国。美国在1987年成立的“半导体制造技术科研联合体”（SEMATECH），帮助美国重新夺回半导体产业领导地位。如今，比利时微电子研究中心（IMEC）成为世界级的半导体创新机构，与美国的Intel公司和IBM公司并称为全球微电子领域“3I”。美国大学的大量教授正在承担Intel、三星和台积电等公司委托的基础研究课题，甚至包括半导体理论的研究课题。而我国至今没有成立类似的机构来组织半导体基础研究的协同创新；国内的半导体企业落后国际先进水平两代以上，主要在别人提供的PDK基础上进行工艺优化以提高良品率，无暇围绕下一代晶体管开展前沿基础研究，难以为大学和科研院所等国家战略科技力量的半导体基础研究“出题”；而大学和科研院所的研究人员只能从文献和会议中了解半导体前沿技术的科学问题，难以找到真问题和真解决问题。

4 加强半导体基础研究能力建设的建议

（1）建立健全跨部门协调机制。建议将国家集成电路领导小组改名为国家半导体领导小组，涵盖半导体基础研究。跨部门协调人、财、物、政策等科技资源，强化攻关决策和统筹协调，负责制定国家半导体发展战略；同时，赋予其相应的资源动员权利，统筹协调各方研究力量，从科技投入、机构建设、学科设置、人才培养、激励机制、产学研协同、产业发展、地方配套等全方位协同推进，确保在半导体技术和创

新领域形成强大合力。半导体领导小组下设办公室，负责聘用产业界和学术界的科学家脱产担任项目经理人、遴选关键核心技术和领军人才、攻关计划监督与落实、攻关目标考核、制定支持政策等事项。建议以半导体产值的10%为标准匹配半导体基础研究经费。建议中国科学院或中国工程院设立半导体学部，工业和信息化部、科学技术部、国家自然科学基金委员会专设半导体部门，以“千金买骨”的手段壮大半导体基础研究队伍和吸引最优秀人才。

(2) 恢复半导体物理专业。由于历史原因和科技体制问题，我国从事半导体物理的研究人员已经屈指可数，必须尽快恢复半导体物理专业；同时，学习20世纪50年代举办“五校联合半导体物理专门化”作为起点向半导体进军战略，紧急集合全国各“双一流”高校的物理专业一半的大三、大四学生，集中培训半导体基础理论课程，选拔一批进入半导体物理专业的博士研究生课程继续深造。通过培养、引进、稳固一大批长期从事半导体物理研究的人才，不追热点，“把冷板凳坐热”，敢于挑战半导体物理最前沿科学问题；在独创、独有上下功夫，努力在半导体技术的源头和底层开辟新方向、提出新理论、发展新方法、发现新现象。

(3) 建设半导体基础研究网络。出台强力措施以弥补半导体基础研究的历史欠帐。立足半导体发展战略需求，聚焦半导体领域前沿科学问题和关键技术，鼓励各研究型高校成立半导体学院。建议国家自然科学基金委员会为半导体基础研究增设国家杰出青年科学基金和创新研究群体等人才类项目的特殊名额，在全国设立10个左右的半导体物理基础科学研究中心，资助20个创新群体和100个研究组。以人才团队效应带动基础研究向半导体领域回流，从而吸引更多优秀人才投身半导体，壮大半导体基础研究力量，强化半导体技术的源头创新能力。

(4) 建立区域联合创新平台。为了实现全栈创

新，跨过研究成果的“死亡谷”，美国即将成立国家半导体技术中心；韩国将设立国家半导体研究院，韩国总统尹锡悦甚至要求韩国教育部为培养半导体人才转变思路进行改革；中国台湾地区成立了半导体研究中心，台湾清华大学成立了半导体研究学院等。我国必须尽快加强半导体领域国家实验室体系的建设，优化国家科研机构半导体领域布局。结合地区半导体产业发展需求，全国建立10个左右大型区域联合创新平台，整合研发创新资源，加强设备共享，减少重复投入，联合攻关产业发展共性技术。为研究型高校、科研院所、半导体产业提供信息共享和学术交流机制，有序引导社会资本参与半导体技术创新，建立广泛的合作联盟，促进创新链与产业链的共融和半导体产业链上下游协同发展。

(5) 深化科技体制改革，用好“指挥棒”。大力扭转实用主义主导科研的弊端，拆除“小农经济”思想下的围墙，出台措施保障显示度低的“死亡谷”创新环节，建立由原始创新驱动的自下而上创新体系，提升基础研究支撑国家发展与安全。建议：①以资金为手段一体化配置学科、人才、评估、平台、政策等科研资源，斩断扭曲需求的权利之手。②大力弘扬追求独创的科学家精神，抵制低水平重复的跟班式研究。③构建资助对象各有侧重的多元化基础研究投入机制，充分发挥国家实验室、科研院所、研究型高校等国家战略科技力量的特色与优势。④基础研究资助体系设立退出机制。新兴研究方向连续资助10年后进行评估，取消没有产生重大应用的资助方向，迫使基础研究人员转向新方向，提升原始创新能力。⑤在制度上保障博士毕业后更愿意从事博士后研究，加强其独立研究和学科交叉能力，把博士后提升为基础研究的主力军。⑥使用学科评估和人才评价等手段，引导研究型高校加强学科多样性。遏制在同一方向重复设置研究团队，破除扎堆在少量热门领域的不利局面，形成“千帆竞发，百舸争渡”的景象；进而，把研究

型高校建成学科门类齐全、研究方向成体系、学术思想活跃、学术氛围浓郁的原始创新策源地。⑦完善知识产权保护制度，激发企业创新动力。

加强半导体基础能力建设，稳定一批半导体基础

研究队伍，在半导体技术的源头和底层进行理论创新，在无法绕开的芯片底层提前布局专利设置“关卡”，是解决半导体关键核心技术“卡脖子”难题的一种有效策略。

骆军委 中国科学院半导体研究所研究员，半导体超晶格国家重点实验室副主任。研究方向：半导体物理与器件物理、后摩尔时代硅基材料理论设计。E-mail: jwluo@semi.ac.cn

李树深 中国科学院院士，中国科学院副院长、党组成员，中国科学院大学党委书记、校长，中国科学院半导体研究所研究员。研究方向：半导体器件物理。E-mail: sslee@semi.ac.cn

■责任编辑：岳凌生