

引用格式：叶甜春, 朱煜, 张国铭, 等. 面向“十五五”的半导体装备的挑战与机遇. 中国科学院院刊, 2025, 40(5): 844-851, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250429001.

Ye T C, Zhu Y, Zhang G M, et al. Challenges and opportunities for semiconductor equipment facing 15th Five-Year Plan. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(5): 844-851, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250429001. (in Chinese)

面向“十五五”的半导体装备的挑战与机遇

叶甜春^{1*} 朱煜² 张国铭³ 杜晓黎⁴ 雷震霖⁵ 苑朋朋¹

1 中国科学院微电子研究所 北京 100029

2 清华大学 北京 100084

3 集成电路装备创新联盟 天津 300350

4 集成电路设计创新联盟 北京 100015

5 集成电路零部件创新联盟 沈阳 110179

摘要 面向“十五五”，我国半导体装备产业面临技术封锁与供应链脱钩的双重挑战，需从“追赶替代”转向“路径创新”，突破对国际技术体系的依赖。文章分析了三大核心需求：支撑自立自强（突破先进制程装备与零部件瓶颈）、构建中国特色创新生态（探索GAA、3D集成等新技术路径）、推动智能化升级（融合AI与数字化技术）。同时，提出以“再全球化”策略应对逆全球化，通过内循环与国际双循环协同，重塑全球半导体产业链。当前，国产装备在成熟制程取得突破，但高端领域仍被美国、日本、欧洲垄断，且面临低水平重复竞争、供应链“卡脖子”等问题。建议通过系统性科技攻关、上下游协同创新，避免内卷，聚焦非对称技术优势，实现从自主可控到自立自强的跨越。

关键词 半导体装备, 集成电路, 路径创新, 再全球化, 产业生态

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20250429001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20250429001

半导体已经深度渗透到全球经济和社会发展的各个领域，是产业升级、数字化转型、智能化应用和网络信息基础设施的基石，是大国必争的战略制高点。

我国半导体产业已成为全球一支不可忽视的力量，遭到美西方前所未有的全方位遏制，成为中美博弈的焦点战场。作为半导体产业的基础支撑，半导体装备是

*通信作者

修改稿收到日期：2025年5月8日

实现半导体技术突破和产业升级的关键。面向“十五五”要求，面对新的国际形势，我国半导体装备需要在现有赛道攻坚克难，也要主动开展路径创新，支撑起具有中国特色的全球半导体新生态。

1 “十五五”期间我国半导体装备需求

半导体制造分为前道制造和后道封装测试两个环节。前道制造装备主要包括光刻、干法刻蚀、掺杂、薄膜、平坦化、热处理、湿法、量测检测、工厂辅助设备这九大类，细分品种总共约190种。不同的制造工艺需要配置不同的制造装备。一般而言，每代工艺演进升级需要升级现有装备，并增加10%—20%的新品种装备。例如，28 nm逻辑芯片生产线共有约120种装备，14 nm生产线则需要增加到约140种装备。半导体存储制造与逻辑制造主要在掺杂和扩散等工艺方面对装备要求有较大差异，还需要约30%不同品种的装备。后道封装测试设备包括减薄设备、划切设备、测试机、分选机等设备。随着芯片集成度的不断提高、制造工艺的不断精进，半导体制造工艺也对装备提出了更高的要求^[1,2]。

面向“十五五”，半导体装备的机遇和需求主要体现在以下3个方面。

1.1 支撑我国半导体产业从自主可控走向自立自强

从2016年开始，美国奥巴马、特朗普、拜登3届政府，不顾国际关系准则和贸易规则，连续不断地出台政策手段，以半导体为武器对我国高科技产业进行全方位的限制和打压。2018年以来，美国更是聚焦半导体产业链，连续推出限制措施，步步紧逼，层层递进，企图打断我国半导体领域的创新发展进程，减缓我国发展速度，限制我国半导体产业向高端发展。

2022年10月7日，美国再次推出新的限制措施，进一步针对高端芯片所涉及的技术体系、产业链体系和人才体系中的环节进行打击，妄图对我国实现“高端锁死”。2023年10月17日，美国进一步发布对华半

导体出口管制升级规则。2024年12月2日，美国发布一份临时最终规则，再度加码对我国半导体制造相关物项出口管制限制，重点针对半导体设备企业。目前，主要的半导体设备企业均已经被列入美国实体清单等。

从2008年至今，在国家科技重大专项、国家集成电路产业基金、科技攻关计划等十几年的持续支持下，结合科创板等一系列政策扶持措施，我国半导体装备及零部件已经建立基本的保障能力，在成熟制程上初步实现了自主可控。但在先进制程装备及其配套零部件上的弱项需要全面系统、长期持续的攻关，以支撑我国半导体产业走向自立自强。

1.2 支撑我国半导体建立中国特色创新生态

全球半导体技术的发展路线正经历着其建立70多年来前所未有的大变局。随着器件特征尺寸微缩逐渐逼近物理极限，晶体管尺寸的进一步缩小变得愈发困难且成本高昂，传统的通过缩小晶体管尺寸来提升性能的方式已愈发困难。为满足半导体性能演进的要求，需要下大力气突破半导体制造工艺及装备技术，尤其是半导体前道工艺设备将继续推动摩尔定律进一步发展^[3]。

与此同时，半导体行业正积极探索新的技术路径，例如，三维结构、光子芯片、量子计算等新兴领域，以期突破物理限制，实现性能飞跃^[4]。同时，先

表1 集成电路逻辑器件技术路线图^[4]

Table 1 Integrated circuit logic device technology roadmap^[4]

时间	工艺节点 (nm)	主要器件结构	关键工艺
2021年	5.0	FinFET	共形掺杂
2022年	3.0	FinFET/GAA	置换式金属栅
2025年	2.1	GAA	侧向/原子级刻蚀
2028年	1.5	GAA	非铜互联
2031年	等效1.0	GAA-3D	超大规模三维集成
2034年	等效0.7	GDD-3D	超大规模三维集成

进封装技术如2.5D/3D堆叠集成电路（IC）、嵌入式芯片封装等，也成为提升集成度、增强算力的重要手段，被业界视为“新摩尔定律”。这些技术革新不仅改变了半导体产品的设计和制造方式，还深刻影响着整个电子信息产业的格局。此外，全耗尽型绝缘体上硅（FDSOI）相比现有主流鳍式场效应晶体管（FinFET）具有工艺简单、制造成本低、高速低功耗等优点，对先进光刻机要求低1—2代，制造装备种类少20%，国产装备和材料已具有相对完整的支撑能力，能够为国内高端芯片制造提供新的先进制程。

我国应抓住这一历史性的机遇，在半导体领域开展变革性创新，摆脱路径依赖，探索新的创新发展路径，重塑半导体芯片工业体系，打造新的生态，走出中国特色自主创新之路。在此过程中，半导体装备将在“中国特色摩尔定律”的发展中发挥至关重要的支撑和引领作用。

1.3 满足半导体对于网络化、数字化、智能化的需求

作为信息技术发展的基础，半导体技术在促进信息技术发展的同时，信息技术也在促进半导体技术发展。近年来，信息技术发展加速推动半导体领域向智能制造发展。智能制造本质上将人工智能（AI）、数字化、网络技术等信息技术与传统制造技术深度融合，通过感知、分析、推理、决策与控制，贯穿于产品设计、生产、管理和服务的各个环节，实现产品需

求的动态响应^[5, 6]。当前，半导体制造设备的智能化水平持续升级，正逐渐向半导体制造全流程全环节智能化的演进。行业研究机构国际器件与系统路线图（IRDS）的分析显示，未来半导体设备将遵循表2所示规划的技术演进路径，分阶段实现更完善的智能化能力^[4]。

2 半导体装备发展现状

2.1 全球现状

全球半导体设备市场呈现产品分工高度全球化、单一产品高度垄断的竞争局势，80%以上的市场份额由美国、日本和欧洲（荷兰）厂商占有，其中，光刻机主要由荷兰和日本厂商提供，干法刻蚀、掺杂、薄膜、平坦化、热处理、湿法、量测检测、工厂辅助设备等主要由中国和美国和日本厂商提供。CINNO IC Research最新发布的全球半导体设备行业研究报告显示，2024年全球半导体设备商半导体营收业务前10位营收合计超1100亿美元，同比增长约10%。

2024年全球半导体设备厂商市场规模前10位中，荷兰阿斯麦公司（ASML）2024年营收超300亿美元，排名首位；美国应用材料公司（AMAT）2024年营收约250亿美元，排名第2位；美国泛林（LAM）公司、日本Tokyo Electron公司（TEL）、美国科磊公司（KLA）分别排名第3、第4和第5位。北方华创科技集团股份有限公司作为前10位中唯一的中国半导体设

表2 半导体设备智能化技术路线图^[4]

Table 2 Semiconductor equipment intelligence technology roadmap^[4]

时间	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年
晶圆信息追溯(包括位置及工艺状态)	研发	验证			持续提升
设备健康监测	验证			持续提升	
预测性维护		验证		持续提升	
虚拟量测		验证		持续提升	
反映腔动态调节	研发			验证	持续提升
成本可视化及工艺时间报告		验证		持续提升	

备厂商，2023年首次进入全球前10位，2024年排名由第8位上升至第6位。

2.2 我国现状

2008年之前，我国12寸半导体关键设备几乎空白，只有少量8寸设备样机，因此国内建造芯片生产线，50%的工艺设备和检测设备需从美国进口，20%的设备（主要是光刻机）需从欧洲进口，30%的设备从日本等其他国家进口。过去十多年，国家科技重大专项、关键核心技术攻关工程等重大科技计划和国家半导体产业基金、科创板等产业政策手段合力，形成了“科技引领、产业跟进、金融支撑”的有效发展模式，开创了产业链、创新链、金融链“三链融合”推动中国半导体高速发展的局面，建立了较为完整的技术创新体系与产业布局，半导体产品设计、制造、封测、装备和材料等五大板块齐整，初步具备了体系化的半导体设备自主供给和创新能力。

在产品^{设计}方面，国内技术能力大幅提高，处理器（CPU）、现场可编程门阵列（FPGA）、通信系统级芯片（SOC）等取得突破。从^{制造工艺}上看，技术取得长足进展。从^{封装集成}上看，从中低端进入高端，传统封装规模居世界第1位，先进封装达到国际

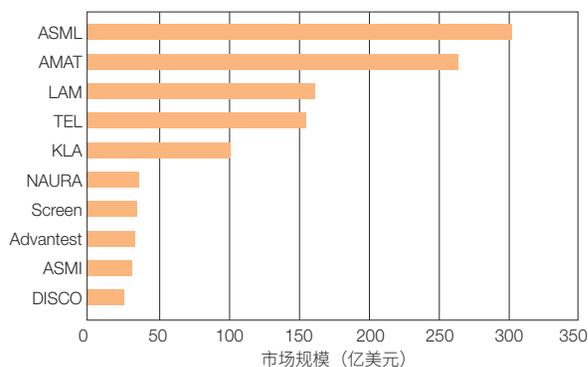


图1 2024年全球半导体设备厂商市场规模排名前10位

Figure 1 Top 10 global semiconductor equipment manufacturer in terms of market size in 2024

数据来源：CINNO • IC Research

Data source: CINNO • IC Research

先进水平。特别是国家科技重大专项培育了200余家集成电路制造、封测、装备、材料和零部件领域的重点骨干企业，其中上市企业近60家，构成了支撑全产业链发展的“四梁八柱”。全行业50余万从业人才，其中核心创新队伍近10万人。总体来看，我国半导体领域形成了技术体系，建立了产业链，产业竞争力大幅提升，差距大大缩小。

在^{半导体设备}方面：前道制造设备中的刻蚀、化学气相沉积、物理气相沉积、化学机械抛光、离子注入、氧化及退火、湿法（清洗/涂胶）、测试等12寸高端设备已完成研发并批量进入市场，等离子刻蚀机、等离子体增强化学气相沉积（PECVD）等多种产品还在国际一线客户先进工艺中得到应用。表3展示了我国半导体装备的主要企业。从^{市场成长}上看，2024年国产半导体设备企业销售总额约为853亿元，较2008年17亿元规模增长50.1倍，极大改善了国内产线对国外设备的依赖现状。

同时也要看到，中国市场半导体设备竞争格局仍主要被美国、日本和欧洲（荷兰）的厂商占据，特别是高端领域。其中，美国应用材料公司在中国设备市场占比27.4%、泛林公司占比14.8%、科磊公司占比6.8%，日本的东京电子公司占比16.2%，荷兰阿斯麦公司占比10.1%，合计市占率超过70%。

3 半导体装备面临的挑战

3.1 摆脱路径依赖，开展路径创新，掌握发展主动权

半导体是全球化产业链分工合作模式最成功的实践。过去20年间，我国半导体产业积极融入国际大循环，以“追赶”和“替代”为主要策略，在全球化生态中安营扎寨，逐步壮大实力，努力开疆拓土，积累起今天的基础和实力，但客观上也使我们的发展形成了对外路径依赖，这是当前我国处于战略被动地位的主要原因。

表3 我国半导体装备主要企业
Table 3 Major semiconductor equipment companies in China

工艺	设备种类	代表企业	所在地
刻蚀	介质刻蚀机(CCP)	中微半导体设备(上海)股份有限公司、北方华创科技集团股份有限公司	北京、上海、江苏
	硅刻蚀机(ICP)	北方华创科技集团股份有限公司、北京屹唐半导体科技股份有限公司、江苏鲁汶仪器有限公司	
薄膜	物理气相沉积(PVD)	北方华创科技集团股份有限公司、鑫天虹(厦门)科技有限公司、江苏鲁汶仪器有限公司	北京、沈阳、江苏、 厦门、上海
	Diffusion/低压化学气相沉积(LP-CVD)	北方华创科技集团股份有限公司	
	原子层沉积(ALD)	北方华创科技集团股份有限公司、拓荆科技股份有限公司、江苏微导纳米科技股份有限公司、上海陞通半导体能源科技股份有限公司	
	等离子体增强化学气相沉积(PECVD)	拓荆科技股份有限公司	沈阳
平坦化	化学机械抛光(CMP)	华海清科股份有限公司	天津
离子注入	Implant	北京烁科中科信电子装备有限公司	北京、上海、沈阳
湿法	Wet clean/Dry clean	盛美半导体设备(上海)股份有限公司、上海至纯洁净系统科技股份有限公司、北方华创科技集团股份有限公司、沈阳芯源微电子设备股份有限公司	
	MASK Clean	常州瑞择微电子科技有限公司	
检测	检测设备	中科飞测股份有限公司、杭州长川科技股份有限公司、东方晶源微电子科技有限公司、上海精测半导体技术有限公司	深圳、杭州、 北京、上海
热处理	退火炉、合金炉、单片退火	北京屹唐半导体科技股份有限公司、北方华创科技集团股份有限公司、北京华卓精科科技股份有限公司	北京、上海
光刻	光刻机(Lithography)	上海微电子装备(集团)股份有限公司	上海
	匀胶机(TRACK)	沈阳芯源微电子设备股份有限公司	沈阳

必须承认，这是一种对国际化体系高度依赖的发展模式，本质上是“拿别人的方案盖楼，用别人的建材架梁，按别人的方法施工”，在带来“省心省力”之利的同时，不可避免地陷入了竞争受制、发展受限的被动格局。在美西方对我国强行脱钩的逆全球化形势下，我国从国外获取先进技术、高端人才、资金等资源越来越困难，继续沿用过去发展策略的基础已逐渐丧失，必须建立新的发展模式，实现“用自己的图纸盖楼，用放心的建材架梁，按拿手的方法施工”，掌握发展的主动权和主导权。

3.2 破解技术演进对半导体设备提出的更高要求

在沿着摩尔定律和新摩尔定律演进过程中，半导体装备在前道制造和后道制造两方面面临挑战：

在前道制造中，随着工艺节点持续微缩，半导体制造中引入了GAA等类型晶体管，这对制造设备提出了更高的挑战。① 离子注入工艺需要从传统掺杂转向共形掺杂技术，以实现三维纳米结构中的均匀掺杂分布；② 薄膜沉积和刻蚀工艺需实现原子级精度控制，其涉及原子层沉积（ALD）和原子层刻蚀（ALE）等先进工艺技术；③ 其他关键工艺设备包括化学机械抛光（CMP）、电化学沉积（ECD）和湿法设备等都需

要进行技术升级，以应对更高精度加工、非铜互连材料应用、新型高介电常数金属栅极（HKMG）（高k金属栅）材料应用等方面的集成需求^[4]。

在后道制造中，为持续提升封装效率并优化生产成本，晶圆级封装技术正在经历从传统封装向先进封装发展。例如：矩形板级封装技术要求对现有基于圆形基板设计的工艺装备需适应性改造，以适应矩形基板的几何特性；玻璃基板技术具备低热膨胀系数、良好的介电和光学性能等优势，适合于大算力封装，但也需要研发对应的专用设备；在硅通孔技术（TSV）工艺技术方面，需要在设备层面解决高密度、高深宽比刻蚀等问题；在超薄晶圆处理环节，需要解决晶圆翘曲和脆性断裂等问题^[4]。

3.3 解决上游半导体零部件等供应链问题

半导体设备作为由数以万计精密零部件构成的复杂系统，其核心零部件的性能参数、质量水平和加工精度直接决定了整机设备的可靠性与稳定性。半导体零部件主要包括机械类、电气类、机电一类、气体传输系统、气动液压系统、真空系统、仪器仪表、光学类等类型，产品包括射频电源、流量计、质量计、真空泵、静电吸盘、密封圈等。国内半导体零部件行业起步比较晚，虽然近年来国内半导体零部件市场规模持续扩大，但当前整体技术水平与国际先进存在明显差距，本土企业在核心技术能力、制造工艺水平、产品精度控制及可靠性验证等方面目前仍难以满足设备和晶圆制造厂商的严苛要求。在全球宏观政治经济日益复杂，美国不断打压遏制我国半导体产业发展的背景下，亟须解决零部件这一半导体装备被“卡脖子”的问题^[7]。

3.4 解决低水平重复带来的内卷问题

目前，我国在半导体产业链的几乎所有环节都呈现出不同程度的内卷。主要表现为“国产替代”演变为“替代国产”，中低端产品和产能快速扩张并竞争激烈，新主体不断涌入半导体领域且抗风险能力差。

以装备业为例，几乎每个已经实现国产化的领域，国内企业数量都超过5家以上。

分析原因，从外部因素看，美国限制我国半导体向14 nm以下先进工艺发展，企业转向横向扩张；从内部因素看，上市红利和地方政府支持吸引大量资本和大量新企业进入半导体设备领域，高薪挖角、同质竞争等乱象不断显现。某些企业依靠产业链优势，抢占资源，大量重复国内已经成熟的产品，严重浪费了创新资源。

低端内卷造成无序、低水平的、恶性的竞争，导致供给端结构性失衡和资源错配，基础创新“动力不足”，阻碍了技术和产业向中高端迈进，形成低端重复、中高端难以突破的局面，破坏了半导体创新生态。

4 下一步建议

半导体具有技术密集、人才密集、资金密集的特点，技术迭代升级极为迅速，创新研发具有为产业发展引领方向的先导作用，是典型的技术引领型产业。坚持科技创新引领产业发展，是实现半导体全局性、长远性、可持续发展的核心关键。

面向“十五五”，我国需改变以“追赶”和“替代”为主基调的发展模式，坚定开展路径创新，多路并进开辟新赛道，上下游协同培育新生态，形成产品定义、特色制造和供应链可支撑的全产业链创新方案。推动新路径与传统路径的竞争与融合，形成新的主赛道，构建技术制高点，建立非对称技术优势和战略制衡能力，赢得发展主动权。以再全球化对抗逆全球化，建立内循环，引导双循环，重塑半导体国际循环体系。利用好国际资源，着力推行中国标准、中国技术、中国产品、中国应用，鼓励国际产业资源参与内循环生态建设，在国际大循环里形成内循环，促进国内国际双循环，重塑全球产业链。

面向“十五五”，必须坚定布局成体系的半导体

装备科技攻关，系统组织产业链上下游协同推进供应链关键产品的验证应用和快速迭代升级，构建完备的半导体装备供应链体系。瞄准先进工艺节点，进一步提升供应链技术水平，形成快速迭代能力，支撑我国半导体产业自主可控良性发展。结合我国超大规模市场优势，打造具有支撑我国独特优势的半导体装备供应链生态。国家相关科技计划要超前部署、梯次布局、聚焦重点、系统攻关，为工艺研发、产业布局和产能建设开路排雷。继续坚持“科技引领、产业跟进、金融支撑”的高效发展模式，建立科技计划与相关产业投资计划紧密互动、高效协同、相互促进的有效机制。在此过程中，破解行业“内卷”，始终将创新放在第1位，有效发挥财政资金的引导作用，避免将有限的资金用于低水平技术的数量扩张；引导地方政府进行半导体产业差异化布局；引导产业链上下游遵守商业规则，行业合作伙伴之间建立好的利益分享机制；完善健全符合半导体产业特点的并购机制。

参考文献

- 曹健林. 新质生产力与高端装备制造: 问题、思考与实践. 中国科学院院刊, 2024, 39(9): 1557-1563.
Cao J L. Emerging productivity and advanced equipment manufacturing: Issues, reflections, and practices. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(9): 1557-1563. (in Chinese)
- 曹健林. 把先进装备制造话语权, 牢牢掌握自己手中. 佛山: 季华实验室, 2024.
Cao J L. Take the right to speak on advanced equipment manufacturing firmly in your own hands. Foshan: Ji Hua Laboratory, 2024. (in Chinese)
- 丁熠, 刘佳甲, 何鹏程. 集成电路制造装备发展现状及展望. 电子工艺技术, 2024, 45(4): 1-5.
Ding Y, Liu J J, He P C. Development status and prospect of integrated circuit manufacturing equipment. Electronics Process Technology, 2024, 45(4): 1-5. (in Chinese)
- 周哲, 付丙磊, 董天波, 等. 半导体工艺与制造装备技术发展趋势. 电子工业专用设备, 2022, 295: 1-8.
Zhou Z, Fu B L, Dong T B, et al. The development of semiconductor process and its manufacturing equipment technologies. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2022, 295: 1-8. (in Chinese)
- 曹健林. 走出一条中国芯片创新之路. 中国政协, 2024, 16: 54-55.
Cao J L. Stepping out of a road of Chinese chip innovation. CPPCC of China, 2024, 16: 54-55. (in Chinese)
- 张国铭. 智能化时代, 国产集成电路制造装备发展的新机遇. 集成电路应用, 2018, 35(1): 55-56.
Zhang G M. New opportunities for the development of domestic integrated circuit manufacturing equipment in the time of intelligence. Application of IC, 2018, 35(1): 55-56. (in Chinese)
- 朱晶. 半导体零部件产业现状及对我国发展的建议. 中国集成电路, 2022, 31(4): 10-17.
Zhu J. The Current Status of Semiconductor Parts Industry and Suggestions for China. IC of China, 2022, 31(4): 10-17. (in Chinese)

Challenges and opportunities for semiconductor equipment facing 15th Five-Year Plan

YE Tianchun^{1*} ZHU Yu² ZHANG Guoming³ DU Xiaoli⁴ LEI Zhenlin⁵ YUAN Pengpeng¹

(1 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3 China Integrated Circuit Equipment Innovation Alliance, Tianjin 300350, China;

4 China Integrated Circuit Design Innovation Alliance, Beijing 100015, China;

5 China Integrated Circuit Parts Innovation Alliance, Shenyang 110179, China)

Abstract During the “15th Five-Year Plan”, China’s semiconductor equipment industry is facing the dual challenges of technological blockade and supply chain decoupling. It needs to shift from “catching up and replacing” to “path innovation” to break through its dependence on the international technology system. This study analyzes three core needs: supporting self-reliance (breaking through the bottleneck of advanced process equipment and parts), building an innovation ecosystem with Chinese characteristics (exploring new technology paths such as GAA and 3D integration), and promoting intelligent upgrading (integrating AI and digital technology). At the same time, it proposes to use the strategy of “re-globalization” to deal with counter-globalization, and reshape the global semiconductor industry chain through the synergy of the internal cycle and the international double cycle. At present, domestic equipment has made breakthroughs in mature processes, but the high-end field is still monopolized by the United States, Japan and Europe, and faces problems such as low-level repeated competition and “stuck necks” in the supply chain. It is recommended to avoid internal entanglements through systematic scientific and technological research and collaborative innovation between upstream and downstream, focus on asymmetric technological advantages, and realize the leap from autonomous and controllable to self-reliance and self-improvement.

Keywords semiconductor equipment, integrated circuits, path innovation, re-globalization, industrial ecology

叶甜春 中国科学院微电子研究所研究员,我国集成电路工艺与器件领域主要学术带头人之一。主要研究领域:集成电路先导工艺与器件、抗辐射电路、纳米加工等核心技术。E-mail: tcy@ime.ac.cn

YE Tianchun Professor of the Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Chief Technical Engineer of National Science and Technology Major Project, one of the main academic leaders in the field of integrated circuit technology and devices in China. His research focuses on key technologies such as integrated circuit advance technology and devices, anti-radiation circuits, nano-processing, etc. E-mail: tcy@ime.ac.cn

■ 责任编辑: 张帆

*Corresponding author