

2024 年 10 月

# 半导体出口的双刃剑

## 控制

### 简介及先进封装技术

作者

杰克·惠特尼

马修·施莱希

威廉·艾伦·赖因施

CSIS 国际商务学院讲座报告

CSIS

CENTER FOR STRATEGIC &  
INTERNATIONAL STUDIES

2024 年 10 月

# 半导体出口的双刃剑

## 控制

### 简介及先进封装技术

作者

杰克·惠特尼

马修·施莱希

威廉·艾伦·赖因施

CSIS 国际商务学院讲座报告

## 关于CSIS

战略与国际研究中心 (CSIS)是一个两党非营利性政策研究组织,致力于提出解决世界上最大挑战的实用理念。

托马斯·J·普利兹克 (Thomas J. Pritzker) 于 2015 年被任命为 CSIS 董事会主席,接替前美国参议员山姆·努恩 (Sam Nunn) (D-GA)。CSIS 成立于 1962 年,由约翰·J·哈姆雷 (John J. Hamre) 领导,他自 2000 年以来一直担任总裁兼首席执行官。

CSIS 的目标是定义国家安全的未来。我们遵循一套独特的价值观 无党派、独立思考、创新思维、跨学科学术、诚信和专业精神以及人才发展。CSIS 的价值观与实现对现实世界产生影响的目标相一致。

CSIS 学者将他们的政策专业知识、判断力和强大的网络运用到他们的研究、分析和建议中。我们组织会议、发表文章、进行演讲和在媒体上露面,旨在提高相关利益相关者和感兴趣的公众对政策问题的了解、认识和重视程度。

当我们的研究有助于为关键决策者的决策和关键影响者的想法提供参考时,CSIS 就会产生影响。我们致力于实现一个更安全、更繁荣的世界的愿景。

CSIS 不采取特定的政策立场;因此,本文表达的所有观点应理解为作者的观点。

© 2024 战略与国际研究中心。保留所有权利。

战略与国际研究中心  
西北罗德岛大道 1616 号  
华盛顿特区 20036  
202-887-0200 | [www.csis.org](http://www.csis.org)

# 致谢

CSIS 国际商务 Scholl 主席感谢过去六个月来为该项目提供宝贵时间和意见的众多专家。作者特别感谢同意根据 Chatham House 规则接受本报告采访的私营部门参与者。我们还要感谢 Scholl 主席 2024 年 7 月 25 日圆桌讨论的所有与会者,讨论内容涉及半导体供应链中的设计挑战。

作者还感谢几位 CSIS 专家在研究和反馈方面的帮助。其中包括贸易和技术项目高级研究员 Barath Harithas,他提供了有关半导体制造和出口管制的重要见解,以及 Scholl 国际商务主席副研究员 Thibault Denamiel,他是一位宝贵的思想伙伴和审阅者。

本报告得益于应用材料公司和 Onto Innovation 的慷慨支持。

# 内容

介绍	1
1   中国战略演变,2018 年至今	9
2   先进封装技术的兴起	十三
3   通过先进封装设计规避美国出口管制	18
4   设计出美国先进封装公司	22
5   摘要 :当今先进封装的现状	24
6   结论与政策建议	二十六
关于作者	二十九
尾注	31

# 介绍

近年来,随着与中国的地缘政治竞争加剧,美国政策制定者越来越多地利用对关键和新兴技术(CET)的限制来维护美国在军事和人工智能(AI)等两用应用领域的领导地位。

## 美国在经济安全战略方面进行了重大转变

出口管制已重新成为美国广泛使用的经济安全工具,旨在通过限制中国获得美国及其盟国的产品来减缓中国的技术进步。先进半导体因其对国家安全的影响而成为这些努力的重点,其中最主要的是先进人工智能系统的实现。

特朗普政府对中国电信巨头中兴通讯采取的行动,标志着美国扩大出口管制的早期关键时刻。2018 年 4 月,唐纳德·特朗普总统对中兴通讯获取包括半导体在内的一系列美国技术实施了严格限制,使该公司濒临破产。<sup>1</sup>尽管特朗普后来改变了决定,但这一事件表明华盛顿再次将出口管制作为经济胁迫的工具。<sup>2</sup>另一个关键时刻出现在国家安全顾问杰克·沙利文(Jake Sullivan)于 2022 年发表的讲话中,他在讲话中宣布,美国必须在先进逻辑和存储芯片领域“保持对中国的尽可能大的领先优势”。<sup>3</sup>这与长期以来的“滑动比例”方法背道而驰,在该方法中,美国试图保持对中国等战略竞争对手的“几代领先”,但并没有采取广泛的措施来限制技术进步。<sup>4</sup>

在拜登政府的领导下,美国政府针对令人担忧的国家 (尤其是中国)的先进半导体供应链实施了两轮重大半导体出口管制。<sup>5</sup>截至本报告发布时,华盛顿仍在就制定进一步措施进行讨论。<sup>6</sup>美国的目标是确保中国的半导体能力远远落后于全球技术前沿,以保护美国的国家安全。

然而,随着美国政府加大力度控制全球半导体市场,中国官员和企业也做出了回应。其方式往往出乎美国决策者的意料。首先,中国决策者和企业采用了各种方法来规避美国的出口管制。<sup>7</sup>这些方法包括通过海外空壳公司从第三国进口受控的美国技术、通过国内技术交易网络将半导体技术转移到被禁止的实体、误导外国供应商了解进口技术的最终用途,以及在法规生效前囤积设备。<sup>8</sup>

虽然规避措施一直是美国出口管制的一个关键讨论话题,但人们对管制的另一个关键影响关注较少:催化中国半导体行业政府和全行业的努力,彻底废除美国公司和技术。<sup>9</sup>尽管北京几十年来一直有兴趣建立国内半导体生产,但拜登政府的管制改变了这些努力的时间表和规模。<sup>10</sup>中国政府和商业部门已开始进行供应链转型,旨在尽可能减少对美国半导体技术的依赖。<sup>11</sup>这些努力旨在减轻当前出口管制的影响,并降低中国半导体生态系统对未来美国贸易行动的长期脆弱性。

中国的半导体生态系统正在遵循两种主要途径来实现这一目标:设计外包和规避设计。这些策略加在一起,可能会使美国的出口管制政策 (即使全面实施)无法成为阻碍中国先进半导体技术进步的长期障碍。更重要的是,它们还可能削弱美国半导体行业的整体领导地位,阻碍美国公司的市场准入和收入,从而削弱其在研发方面的长期领导地位:

1.设计出路:用同类技术取代现有的美国和盟国的半导体技术,无论是

- a. 中国公司;或
- b. 第三国 (非美国和非中国公司)

2.围绕设计:开发新技术,消除一整类  
半导体供应链中的控制技术

中国的“设计排斥”和“规避”行为对致力于打造强大的国内技术工业基础、与强大的军民两用技术竞争的美国决策者和国内商界领袖构成威胁,因此对美国的国家和经济安全构成威胁。



本报告认为,如果不加以适当应对,美国的出口管制政策可能会无意中破坏美国在与中国进行地缘政治和经济竞争以“赢得 21 世纪”的长期定位。<sup>12</sup>

## 设计策略

中国决策者越来越担心中国半导体供应链对美国技术的依赖。<sup>13</sup>私营部门利益,即中国半导体公司,也已意识到过度依赖美国技术的商业风险。为了尽量减少当前限制的影响并对冲未来管控的收紧,中国决策者和半导体公司正在努力将美国技术从中国半导体生态系统中“剔除”出去,换句话说,尽可能用其他供应商取代美国供应商。

如今,美国以外的生产线正以两种方式建设。首先,中国中央和地方政府正在投资数十亿美元,帮助国内企业生产制造半导体所需的设计、部件和工具。<sup>14</sup>与此同时,政府也对中国半导体公司施加新的压力,要求它们在国内采购关键技术。<sup>15</sup>这些制造商本身也对依赖外国技术的商业风险心存警惕,因此也越来越渴望从中国供应商那里购买产品。

第二,来自第三国(即美国和中国以外的国家)的公司

由于担心收入损失和进入中国市场的机会减少,这些国家的政府不愿扩大对中国的出口管制,但它们正在填补美国公司留下的空白。<sup>16</sup>随着中国半导体制造工厂从美国供应商处购买的技术越来越少,市场机会开始向在管制政策或执法方面与美国并不完全一致的第三国公司开放。

美国的管制旨在适用于境外,这表面上使进口替代变得复杂。然而,在实践中情况并非如此。尽管美国有外国直接产品规则(FDPR)和与管制相关的最低限度限制,限制外国公司使用某些美国技术内容,但仍有强有力的证据表明外国正在发生进口替代。<sup>17</sup>尽管荷兰和日本在 2023 年实施了新的管制措施,复制了美国限制措施的某些方面,但关键差异仍然存在于范围和执法能力上。例如,外国公司向中国客户提供现场服务的能力。<sup>18</sup>德国、韩国和以色列等知名供应国也没有实施类似的管制。美国则继续向盟友施压,要求其扩大出口制度以实现协调,但成功已证明具有挑战性。<sup>19</sup>



## 外国直接产品规则

如果外国制造的物品是某些类型的美国原产设备、软件或其他技术的“直接产品”，并且目的地是指定国家，则 FDPR 将美国出口管理条例 (EAR) 应用于这些物品。具体而言，如果所列的美国技术直接用于生产这些物品或生产用于制造这些物品的工厂的关键部件（例如工具或软件），则 FDPR 授权工业和安全局 (BIS) 要求对某些外国制造的物品进行出口许可，即使受控的美国组件或系统未出现在产品中。<sup>20</sup>

三种 FDPR 限制中国获取半导体技术：实体清单 (EL)、高级计算和超级计算机 FDPR。<sup>21</sup>这些 FDPR 在所涵盖的产品、公司和国家方面有所不同。特朗普政府于 2020 年 5 月推出的 EL FDPR 将美国出口管制应用于运往数百家中国（和其他外国）公司及其子公司的产品。<sup>22</sup>这些限制因涉及的产品以及适用于购买公司的 EL 分类类型而异。随着美国

商务部已将中国公司添加到 EL。<sup>23</sup>高级计算 FDPR 将 EAR 应用于满足某些性能参数的较窄范围的产品，并且基于目的地国家（而不是目的地公司）。

《高级计算 FDPR》最初针对中国，后来扩大了目的地国家名单，包括中国可能用来逃避管制的国家，例如哈萨克斯坦和蒙古。<sup>24</sup>最后，《超级计算机 FDPR》应用了国家和最终用途范围，以涵盖用于生产超级计算机的任何受《EAR》约束的物项，这些物项是根据计算能力和系统尺寸定义的。<sup>25</sup>

## 最低限度规则

最低限度规则适用于《出口条例》，其依据是将美国原产地受控投入品纳入运往特定国家的外国出口商品中。值得注意的是，与 FDPR 不同，使用最低限度规则要求出口商品直接包含在

属于《出口管理条例》管辖范围的美国企业。<sup>26</sup>这与《公平分配政策与规则》的更广泛门槛不同

货物是某些美国原产技术或投入的“直接产品”（无需包含在实际运输的货物中）。如果将美国投入品单独运输到最终目的地国家（即未纳入最终产品时）需要许可证，则需要对包含这些投入品的产品的国外出口进行最低限度计算。根据产品类型和目的地国家，具体商品适用不同的最低限度门槛——即美国原产管制物项占《出口管理条例》适用的“公平市场价值”的最低百分比（通常为 10% 或 25%）。<sup>27</sup>如果商品超过

根据《出口管理条例》,如果产品符合最低限度标准,则需要获得出口豁免。对于某些产品(例如某些光刻工具),适用零最低限度标准,这意味着任何受美国原产地控制的投入都会自动适用《出口管理条例》。<sup>28</sup>

## 规避设计策略

除了努力利用国内和第三国供应商一对一地取代美国技术之外,中国还寻求开发新功能,提供替代方法来实现微电子系统中尖端芯片所提供的相同性能。

这些创新将使中国的半导体生态系统能够实现先进人工智能等应用所需的能力,并使用源自中国(而非美国或合作伙伴国家)的知识产权(IP)和制造能力的技术来实现这一目标。本报告将此类努力称为“规避设计”。

围绕美国出口管制进行创新的动力不断增强,这促进了国内研发力度,并有可能使中国在已经占据强大市场份额的行业领域(如封装领域)更快地取得半导体技术优势。<sup>29</sup>

例如,先进的封装创新为中国企业提供了一条潜在途径,使其无需复制西方的半导体制造设备技术,即可实现尖端芯片能力。<sup>30</sup>

---

围绕美国出口管制进行创新的动力日益增强,这促进了国内研发力度,并可能使中国更快地走上半导体技术领先之路。

除了设计外包之外,规避设计为中国半导体生态系统提供了另一种工具,以减少供应链对美国技术的依赖。这也为中国公司最终在半导体供应链中超越美国技术能力创造了潜在机会。2024年4月,一位负责出口执法的美国高级官员在参议院小组作证时,呼吁关注规避设计问题的长期危险。“我……担心有一天……[中国人]不想要我们的技术,

我们不再是世界领导者的那一天,因为这意味着他们已经超越了我们,他们变得更优秀了。”<sup>31</sup>

## 对美国经济和国家安全的影响

从根本上来讲,完善的先进两用技术出口管制旨在在没有其他供应方式的情况下规范货物出口。否则,买家可以

只需将受控商品的采购转移到国内供应商或管制较松的国家即可。如果受控技术可以很容易地从国内公司或出口管制制度之外的外国获得（即设计外），那么限制只有在替代技术能够填补由此产生的需求缺口时才会成功。此外，随着新的替代技术的出现（即设计外），出口管制政策必须相应调整，否则它们可能会成为本国出口收入及其在全球经济中影响力的障碍。

在“滑动比例”出口管制时代，美国的对手一直落后于技术前沿，这在很大程度上是由于美国公司在关键技术领域的全球研发领导地位。<sup>32</sup>在转向当前方法——“保持尽可能大的领先优势”时，美国希望利用其行业领导地位来遏制中国在军事和军民两用技术方面的技术进步。然而，设计淘汰现象可能会无意中破坏这一目标，并最终对美国对中国的技术领先地位构成威胁，而不是促进。<sup>33</sup>

设计外包举措的主要担忧在于，这将使中国将全球半导体行业收入从美国公司转移出去，缩小美国的市场份额，并为中国和第三国公司创造新的机会。<sup>34</sup>这种风险绝非微不足道，因为中国半导体市场是——并且预计仍将是世界上最大的市场。<sup>35</sup>

潜在影响并不局限于中国半导体市场本身，因为出口管制可能会为外国跨国公司创造新的激励，使其限制使用美国技术，以避免面临影响进入中国市场的出口管制。<sup>36</sup>

这样一来，美国目前的出口管制可能会无意中允许外国公司取代美国半导体领军企业在全全球市场的关键部分。如果发生这种情况，美国科技公司将失去收入和股价增长，而这些收入和股价增长是研发投资的原料。<sup>37</sup>鉴于技术变化速度快以及保持领先地位的重要性，研发对于半导体行业的公司至关重要，因此任何投资减少都可能对公司的定位造成毁灭性打击。<sup>38</sup>这意味着研发损失可能导致美国公司失去目前在半导体供应链关键部分的技术领先地位——这与出口管制的目标完全相反。

如果中国半导体行业能够成功将美国技术从其供应链中剔除，那么美国政府也将失去获取中国设备采购数据的权利，而目前美国公司销售的这些设备可以获取这些数据。这些数据可以洞悉中国人民解放军（PLA）的军事和军民两用能力，从国家安全角度来看，这会带来优势。美国决策者还将失去对中国的关键杠杆作用。如果中国不再利用美国技术制造芯片，继续实施和执行美国出口管制——以及威胁引入新的管制——对美国的经济和国家利益将无济于事。

最后，美国还将放弃部分影响持续教育技术开发和利用的能力，这是全球技术市场中的一个关键优势。下表提供了

概述为什么 CET 标准制定对美国与中国和其他对手的战略竞争如此重要。

通过这一系列报告,CSIS Scholl Chair 将寻求详细阐述和评估与中国和全球半导体供应链相关的设计外包和规避设计威胁。分析将侧重于半导体供应链的四个关键阶段。对于每个阶段,研究结果将重点介绍 (1) 中国和第三国公司设计外包的风险,(2) 规避设计解决方案的潜力,以及 (3) 这些策略对美国经济和国家安全的影响。

表 1:美国 CET 标准设置

标准为什么重要？	制定标准的目标	美国政府的标准制定策略
标准制定是一项重要的工作,它影响	成为 CET 全球先行者的关键优势之一	2023 年 5 月,白宫众议院发布了
新技术的开发和使用。	开发就是制定使用标准的能力。	国家标准
当强有力的标准被创建和维护时,使用标准化技术的行业的	当一套标准被采用而另一套标准被采用时,使用更广泛标准的国家经济可能会获得巨大利益。因此,出于经济和国家安全的考虑,美国有必要制定 CET 的使用标准。考虑到中国试图制定竞争技术标准,制定标准的紧迫性只会更加突出。40	关键和新兴技术战略。41
创新和技术完整性就会得到加强。39		除其他事项外,该战略文件呼吁美国在持续教育与培训标准制定方面发挥领导作用,特别是在其全球领导地位在二十一世纪受到挑战的情况下。42

来源:白宫,美国政府关键和新兴技术国家标准战略（华盛顿特区:白宫,2023 年 5 月）, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/05/US-Gov-National-Standards-Strategy-2023.pdf>。

第一份报告简要介绍了设计外包和规避设计现象,以及它们如何在中国政府和私营部门中形成。然后,它转向半导体供应链中的封装环节,这是规避设计的一个主要例子

威胁。先进封装代表着密集创新领域,中国已将其确定为战略重点,以努力破坏美国出口管制的有效性。<sup>43</sup>

在后续报告中,Scholl Chair 将涵盖半导体制造设备和工具子系统和组件,以及电子设计自动化 (EDA)、芯片设计和核心设计 IP 等领域。每份报告都将为设计外和设计规避现象提供证据,并评估这些中国应对策略的潜在影响。

最终,有人认为,由此导致的对全球半导体行业影响力的丧失将损害美国经济和国家安全。

# 1

## 中国战略演变， 2018 年至今

美国（及其盟友）的出口管制危及中国决策者和企业设计中国关键技术供应链的担忧，以及战略贸易管制只会变得越来越普遍。中国政府最高层对此并不陌生。<sup>44</sup>北京长期以来一直担心其在“核心技术”（包括半导体）方面依赖外国制造。习近平 2013 年当选总书记后，这一关注度进一步增强，这反映在具有里程碑意义的产业政策文件《中国制造 2025》中提出的雄心勃勃的半导体自给自足目标中。<sup>45</sup>然而，尽管有这些自上而下的目标，中国半导体公司仍然大量从美国和其他外国供应商那里采购关键技术。<sup>46</sup>

特朗普政府 2018 年对中兴通讯的限制 以及美国出口管制可能导致中国一家民族科技领军企业破产的暗示 使得摆脱对美国技术的依赖变得更加紧迫。<sup>47</sup>另一个警示是华为在被列入实体名单后濒临倒闭，这导致其智能手机业务陷入多年瘫痪。<sup>48</sup>华为与中国政策制定者一道，试图重塑国内技术供应链，以减少对外国（特别是美国）的依赖，投资于新的垂直整合工作以及与本地供应商的合作。<sup>49</sup>

然而，最重要的转变发生在 2022 年 10 月 7 日。拜登政府根据《出口管理条例》制定的新规则比中国和第三国商业和政府利益相关者预期的要广泛，从根本上改变了有关美国技术

几乎在一夜之间,中国的自给自足目标就从自上而下的广泛目标转变为全行业的供应链努力,以确保中国半导体行业的未来不受当前和未来美国限制的影响。<sup>50</sup>

正如美国一家顶级半导体公司的员工所描述的那样, “2022 年 10 月的单边监管给中国创新经济注入了‘喷气燃料’。”<sup>51</sup>

本系列报告重点关注中国政府和企业为实现“去美国化”半导体供应链这一目标所采用的主要途径,以及这些途径对美国 and 全球半导体市场的影响。在进行背景研究时,我们发现了有关中国半导体制造和采购行为的几个基本事实:

1. 抛开政治因素,中国企业大多倾向于使用最先进的半导体工具和技术,其中大部分是在美国和盟国生产的。

在正常情况下(即没有近期的出口管制趋势),中国企业可能会继续在行业领先的领域购买和使用美国技术。

2. 中国长期的目标是打造一个不依赖美国设备的半导体制造供应链。政策制定者和商界领袖正在指导国内半导体公司寻找美国技术的替代品。政府机构也通过补贴和研发项目大力投资国内半导体供应链,以创造外国技术的替代品。

3. 中国半导体行业正在开展一项由政府支持的运动,该运动相对成功,敦促中国公司购买国产设备,而不是购买外国供应商的设备。

4. 中国晶圆厂和其他半导体行业参与者通常会购买技术上不如外国同行先进的中国技术,以减少对外国的依赖并培育国内产业。

5. 当国内没有可以替代美国技术的设备时,中国企业会寻求从总部设在对华经济安全政策不那么强硬的国家的公司采购设备。从美国公司购买新设备通常被视为最后的手段。

6. 为应对美国的出口管制,来自第三国(即非美国)的公司

无论是美国还是中国,许多大型跨国公司都在积极寻求取代美国公司在中国半导体供应链中的地位。有些公司甚至利用美国监管障碍的缺失来吸引中国客户。<sup>52</sup>

这些断言在很大程度上反映了有关中国半导体行业的公开报道的结论。中国政策中关于这些趋势的最明显证据是“79号文件”(也称为“删除A”,代表“删除美国”),这是一项高度敏感的战略计划,旨在清除中国数字供应链中的西方技术,而这些技术已部分泄露给西方消息来源。<sup>53</sup>在具有里程碑意义的2022年10月7日美国出口管制方案出台前的几周里,



中国领导层私下发布了 79 号文件。据《华尔街日报》报道,该计划鼓励企业从国内企业采购技术,即使在外国替代品更为先进的情况下也是如此。<sup>54</sup>

79号文件报告中所描述的趋势得到了广泛来源的支持。

这些趋势也贯穿整个半导体供应链,从设计到制造设备再到封装。例如,在半导体制造设备 (SME) 领域,中微半导体 (AMEC) 和北方华创科技集团等中国公司在关键招标中击败美国领先企业,赢得的份额不断增加。<sup>55</sup>在子系统和组件领域,中国正试图开发自己的极紫外光刻 (EUV) 光源,并取代化学品、气体和其他材料的外国供应商。<sup>56</sup>在设计和电子设计自动化 (EDA) 领域,摩尔线程和九天科技等中国初创公司开始从美国公司手中夺取一些市场份额。<sup>57</sup>这些案例只是从更广泛的证据中抽取的说明性例子,因为这些趋势将在每个供应链阶段的报告中详细探讨。

美国公司被排除在半导体供应链关键环节之外的威胁是多方面的,而且日益严重。由于政策制定者和企业正试图培育新的国内替代品,设计外包努力正在推动中国企业的发展。这种努力在第三国半导体行业也很明显,机会主义的非美国公司正在寻求填补美国公司在中国留下的需求空白。

设计规避威胁也在不断出现。中国创新领导力体现在半导体供应链的多个环节,其中一些环节不受出口管制法规的约束。先进封装是这一趋势的一个关键例子,但在半导体制造设备中也有其他例子,例如使用较旧的光刻和蚀刻工具生产尖端芯片的新尝试。<sup>58</sup>

因此,当前的美国经济安全政策可能会无意中导致它试图阻止的事情发生:尖端半导体创新和制造加速超越美国及其盟友的边界。

虽然本系列报告将涵盖中国在大部分供应链中针对美国出口管制采取的应对策略,但本报告重点关注先进封装。这些技术是当今芯片生产的一个关键增长领域,也是中国在实践中实施规避设计努力的典型案例。重要的是,与 EUV 光刻等制造技术相比,先进封装及其相关资本设备 (1) 开发技术难度较低,而且不那么被美国及其盟友独家主导,(2) 有可能推动人工智能大型语言模型 (LLM) 等尖端应用,而无需先进芯片。<sup>59</sup>虽然先进封装的某些部分正在采取规避设计努力,例如不再使用美国的封装工具和先进基板等投入,但本文将重点关注规避设计,因为它对行业的影响更大。

毫不奇怪,美国经济安全政策制定者试图阻止中国开发尖端技术,他们感到有必要对抗先进封装技术的推动力。然而,试图广泛控制这些技术可能只会损害美国公司,因为它们在供应链中缺乏主导地位,而且在竞争激烈的全球市场中运营。封装是一个明显的例子,表明规避设计如何威胁美国的技术优势,必须得到适当解决。

---

因此,当前的美国经济安全政策可能会无意中导致它试图阻止的事情发生:尖端半导体创新和制造加速超越美国及其盟友的边界。

本文仅关注封装服务和工具。<sup>60</sup>它不涉及封装设计工具和整体芯片设计服务和 IP,也不涉及封装过程中使用的物理测试工具。封装设计和测试将分别在 (1) EDA 和芯片设计和 (2) 半导体制造设备的简介中介绍。设计先进封装依赖于芯片设计中使用的许多相同软件工具,例如 Synopsys 和 Cadence,并且通常与“无晶圆厂”或仅进行设计的半导体公司和代工厂的芯片和制造工艺设计协同进行或作为芯片和制造工艺设计的一部分进行。<sup>61</sup>测试工具虽然用于封装工艺,但对半导体制造也很重要,并且具有与蚀刻和工艺控制等领域使用的半导体工具更相似的设计和动态。出于这些原因,本文不介绍这些技术和公司。

## 2

# 先进技术的崛起 封装技术

## 背景:追逐摩尔定律

自半导体技术诞生之初,芯片制造商就一直追求提高计算能力和效率的双重目标。几十年来,这些目标都是通过增加芯片上的晶体管数量来实现的,主要是通过组件小型化。摩尔定律 英特尔联合创始人戈登·摩尔于 1965 年提出的一项观察 预测制造商可以在集成电路上安装的晶体管数量每两年就会翻一番。<sup>62</sup>

研究人员和工程师们不断寻求发明方法,在芯片上安装越来越多的晶体管,同时优化功率 (P) 与性能 (P) 以及芯片面积 (A) 与成本 (C) 之间的关键权衡,这一范例统称为 PPAC。<sup>63</sup>在半导体行业的大部分历史中,制胜策略是不断缩小晶体管尺寸。对于每一代芯片,节点名称 (例如 “50 纳米”) 指的是芯片最小特征的实际尺寸 通常是其栅极长度 该尺寸正在迅速减小。<sup>64</sup>

然而,近年来,晶体管尺寸的缩小速度比过去要慢,这让人们对摩尔定律的持久性产生了怀疑,也增加了对提高计算能力和效率的替代策略的需求。<sup>65</sup>大约在 2000 年代后期,前沿节点名称不再表示芯片的确切最小特征尺寸。相反,节点名称开始象征晶体管密度的总体增加,而这并非通过缩小晶体管尺寸来实现的,而是通过减少特征数量和减少晶体管之间的空间等新方法来实现的。<sup>66</sup>

然而,即使是这些新方法有时也难以维持过去十年中摩尔定律预测的速度,而提高晶体管密度的资本成本不断膨胀,已经对通常与摩尔定律相关的经济推论提出了挑战,该定律认为每个晶体管的成本与晶体管的数量成反比。<sup>67</sup>

## 先进封装的兴起

先进封装已成为一种有前途的替代方案,既可以提高晶体管密度,又可以通过其他方式扩展处理能力和效率,尤其是与投资晶体管级别的变革相比,它是一种更具资本效率的替代方案。<sup>68</sup>用于连接不同芯片和印刷电路板 (PCB) 的架构和材料在优化 PPAC 方面与晶体管架构本身一样重要,代表着一个关键机会。例如,芯片封装内内存和逻辑单元之间的互连密度历来是一个通信瓶颈,它落后于晶体管密度的增长。<sup>69</sup>

在过去的几十年里,半导体封装通常被视为高度先进的芯片制造工艺中一个有点商品化的最后一步。封装的功能传统上是将芯片与其他组件隔离开来,并将其连接到 PCB。<sup>70</sup>在传统应用中,PCB 负责在芯片和其他电路组件之间传输电力和信息。传统封装是制造过程中的一个低价值步骤,历来外包给专门从事封装和测试的第三方公司 (通常位于劳动力成本较低的国家)。<sup>71</sup>

另一方面,先进封装设计是一个较新的领域,旨在以改善输入/输出 (I/O)、减少延迟 (计算指令发出和数据开始传输之间的延迟时间)和提高能效的方式排列芯片组件及其互连部件。因此,它采用了与传统封装完全不同的工艺和技术。

值得注意的是,先进封装发生在上游和下游制造过程中。传统封装是一个完全后端的过程,发生在下游,通常由外包的半导体组装和测试 (OSAT) 供应商执行。这种外包之所以存在,是因为封装由于其商品化性质,利润率低于前端制造,而 OSAT 主要在成本上竞争。<sup>72</sup>

另一方面,先进封装正在将大部分封装工艺向上游转移。<sup>73</sup>新的创新方法正在改变代工厂在制造过程中准备芯片的方式,例如逻辑和内存代工厂合作使他们的芯片无缝集成到最终封装中。<sup>74</sup>为了构建先进的封装架构,需要在整个前端晶圆制造过程中集成某些技术和方法,为芯片制造商创造增加其行业增值份额的机会。

## “Chiplet”与异构集成

一项特别重要的先进封装创新是“小芯片”设计,它将多个具有独立功能的芯片集成到一个封装单元中。用于实现小芯片设计的封装方法 (称为异构集成)与传统封装方法相比,有可能实现更高的功率效率、更快的数据传输速率和更低的信号衰减。<sup>75</sup>小芯片设计的一个主要优势是可以灵活地满足不同的应用需求。系统中经常交互的半导体元件可以

放置在更近的地方,以减少延迟和功耗需求。例如,对于严重依赖内存功能的 AI 计算,将内存芯片放在更靠近处理核心的位置已被证明是一种强大的设计解决方案。<sup>76</sup>

重要的是,小芯片技术可用于创建性能与包含尖端半导体的微电子系统相当的微电子系统,而无需获得制造此类芯片所需的先进制造技术。因此,对于寻求遏制中国技术进步的美国决策者来说,小芯片已成为一个严重问题,因为 EUV 光刻等尖端芯片制造工具是阻止中国获得先进半导体能力的关键“瓶颈”。

## 对先进封装产品实施出口管制

对美国监管机构来说,更具有挑战性的是,先进封装在很大程度上是由广泛可用的设备和材料实现的。与半导体制造不同,半导体制造发生在纳米级(十亿分之一米),每一步都需要高度复杂的设备,而先进封装工艺通常以微米级(大一千倍)为单位。虽然制造先进封装的半导体需要一些专用机器,但与制造相比,大多数工具在技术上不那么细分,开发难度也更小。此外,先进封装所用的设备和材料的供应链涉及中国公司,与中小企业或芯片设计相比,供应商的多样化程度更高,这使得潜在的单边、双边或三边协议不那么有效。<sup>77</sup>

然而,有一些难以获得的投入和技术可以实现先进封装,值得特别介绍:混合键合和先进基板。这些技术中的每一种都使公司能够创建性能远超传统封装的先进芯片封装,即使在底层芯片级别的类似工艺节点中也是如此。

### 混合键合

推动先进封装创新最具影响力的技术或许就是混合键合。<sup>78</sup>简而言之,混合键合是一种使用间距很近的铜垫垂直连接制造好的半导体晶圆(切割成单个芯片后通常称为“管芯”、“芯片”或“管芯”)的方法,从而在离散芯片之间形成极短的互连距离。<sup>79</sup>重要的是,混合键合可以实现先进的“3D”晶圆堆叠,这有望在未来摩尔定律在功率和性能方面的进步中发挥关键作用。<sup>80</sup>使用混合键合可以显著提高给定芯片封装的性能。无需推进底层半导体的工艺节点,计算效率就可以大大提高,从而实现各种前沿应用。<sup>81</sup>

混合键合可以通过两种方式完成:晶圆上晶圆(W2W)或芯片上晶圆(D2W)。

在 W2W 键合中,晶圆被堆叠在一起,完成后将堆叠的晶圆切成小块。

在 D2W 键合中,晶圆在堆叠之前被切割成单个芯片。这两种方法都需要专门的制造设备,例如芯片贴装和激光切割工具。<sup>82</sup>

表 4. 先进封装供应链中的关键全球参与者

供应链部分	类别	公司（及总部所在国家）
设备	装配检查	KLA（美国）、ASM Pacific（中国）、ASTI（新加坡）、Koh Young Tech（韩国）、Cohu（美国）、MIRTEC（韩国）、Grand Tec（中国）
	切割	DISCO（日本）、Accretech（日本）、ASM Pacific（中国）、Longhill（中国）、SYNOVA（中国）
	芯片粘接	Besi（荷兰）、ASM Pacific（中国）、Fasford Tech（日本）、Canon（日本）、Hoson（中国）、PROTEC（韩国）、JIAFENG（中国）、DIAS自动化（中国）
	引线键合	Kulicke & Soffa（新加坡）、ASM Pacific（中国）、黑森州（Germany）、Shinkawa（Japan）、JIAFENG（China）、DIAS自动化（中国）
	高级互连	ASM Pacific（中国）、SSP（韩国）、KOSes（韩国）、迪亚斯自动化（中国）
	包装	TOWA（日本）、ASM Pacific（中国）、Besi（荷兰）、HANMI（韩国）、Trinity Tech（中国）、Grand Tec（中国）、DIAS自动化（中国）
	集成组装	ASM Pacific（中国）、Grohmann（德国）
材料	引线框架	SH Material（日本）、Mitsui High-Tec（日本）、ASM Pacific（中国）、信光（日本）、康强（中国）、华龙（中国）、三一（中国）、永志（中国）
	键合线	Heraeus（日本）、Tanaka Denshi（日本）、Nippon Micro（日本）、Doublink（中国）、康强（中国）、YesDo（中国）、KDDX（中国）
	陶瓷封装	Amkor（美国）、Quik-Pak（美国）、NGK（日本）、Alent（英国）、日立（日本）、京瓷（日本）、LG（韩国）、住友（日本）、巴斯夫（德国）、三井高科技（日本）、汉高（德国）、东丽（日本）、田中（日本）、中威（中国）、宜兴（中国）
	基材	Ibiden（日本）、NanYa（台湾）、Shinko（日本）、三星（韩国）、深南电路（中国）、珠海悦亚（中国）、安凯姆（中国）
	封装树脂	住友（日本）、汉高（德国）、日立（日本）、Sinopaco（中国）、HHCK（中国）
	芯片粘接材料	汉高（德国）、日立（日本）、住友（日本）、Darbond（中国）、Hysol Huawei（中国）、Y-Bond（中国）

来源:Saif M. Khan,《半导体供应链》,安全与新兴技术中心,2021 年 1 月, <https://cset.georgetown.edu/publication/the-semiconductor-supply-chain/>  
Khan, Saif. “半导体供应链。”安全与新兴技术中心,2021 年 1 月。<https://cset.georgetown.edu/publication/the-semiconductor-supply-chain/>  
出版物/半导体供应链/。

Besi 是一家专门生产先进封装工具的荷兰公司,是混合键合领域的主要参与者。根据公司数据,Besi 占据了“芯片贴装”全球总市场的 40%,占据了“先进芯片放置”全球总市场的 74%。<sup>83</sup>这两种技术都是 D2W 混合键合操作的关键组成部分。Besi 的主要竞争对手包括两家总部位于新加坡的公司,ASMPT 和 Kulicke & Soffa。<sup>84</sup>

混合键合工艺大部分在晶圆厂而非 OSAT 中执行。开发混合键合能力的主要公司包括台湾半导体制造公司 (TSMC)、三星、英特尔和 SK 海力士等领先芯片制造商,以及中芯国际 (SMIC) 和长江存储科技股份有限公司 (YMTC) 等中国公司。但就现有的规模生产而言,混合键合仅限于台积电生产的少数 AMD 芯片和某些 3D 存储芯片。预计未来五年将出现重大突破,例如台积电的 3D 堆叠系统级集成芯片 (SOIC) 封装,预计将于 2027 年上市。该设计基于台积电领先的晶圆基板芯片 (CoWoS) 工艺 一种在先进性方面比混合键合低一步的“2.5-D”封装 已被证明对 AI 数据中心应用至关重要。<sup>85</sup>

### 先进基板

基板在芯片的制造和封装中有两个主要用途。首先,基板是进行微加工的基本表面。其次,对于先进封装而言,基板更重要的是充当芯片“大脑”和“电气高速公路”之间的连接点。<sup>86</sup>

芯片的计算操作发生在芯片上,芯片本质上是芯片的“大脑”。在操作过程中,信息从印刷电路板 (“电气高速公路”) 进入,通过基板,到达芯片,在芯片上执行计算操作。然后,处理后的信息通过基板返回到印刷电路板进行进一步传输,从而离开芯片。

芯片功能的扩展和 5G 基础设施、航空航天和国防、高性能计算和电动汽车 (EV) 等专业应用的增长,增加了对能够承受高信号频率、高热量和高数据吞吐量要求的半导体的需求。在这些条件下,先进的基板通常能够独特地实现所需的高性能功能。因此,基于砷化镓 (GaAs)、氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 等先进基板的芯片封装的重要性日益增加。后两者被视为“宽带隙”半导体,与传统半导体相比,它们可以在更高的电压、温度和频率下工作,并在各种可再生能源技术的生产中发挥关键作用。<sup>87</sup>

当前先进基板供应链主要分布在三个地区:台湾、日本和韩国。这三个国家的公司合计占全球先进基板收入的 88%。台湾在先进基板生产中占有重要份额,其中以欣兴电子、南亚 PCB 和景硕等公司为首。

然而,中国有志于通过引入深南电路和 Access 等新参与者来扩大市场。中国在先进基板市场不断增加的投资有可能夺走当前领先者的市场份额。美国也希望借助《芯片与科学法案》下的政府补贴在市场上站稳脚跟,尽管其份额仍然很小。<sup>88</sup>



### 3

# 围绕美国进行设计 先进封装出口管制

官员和公司设计绕过美国对先进芯片的出口管制,并通过非管制技术追求性能提升。在这些  
**先进封装技术为中国政府提供重要机遇**

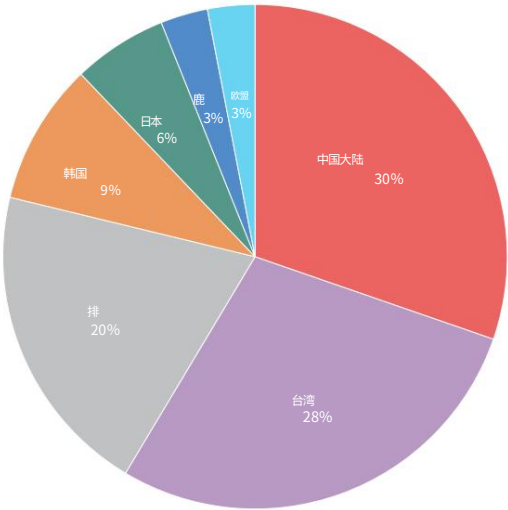
由于在传统半导体封装领域拥有强大的市场地位,这些公司拥有中等的在位优势。虽然全球封装市场在地理分布上比芯片设计和制造等半导体行业细分市场更加分散,但中国仍是全球领导者,控制着 38% 的组装、测试和封装 (ATP) 增值活动。<sup>89</sup>中国主要的外包半导体组装和测试 (OSAT) 公司包括江苏长电科技 (JCET) 和通富微电子,这两家公司历来都为 ATP 的主要外国代工厂提供低成本合作伙伴关系。<sup>90</sup>

英特尔、GlobalFoundries 和 Onsemi 等美国半导体制造商的大批量封装设施都位于中国境内,这表明该国可能广泛拥有封装技术和专业知识。例如,截至 2021 年,中国拥有 111 家 OSAT ATP 设施和 23 家集成设备制造商 (IDM) 设施,占全球所有设施的 28% (无论公司总部在哪里)。<sup>91</sup>此外,与其他类型的半导体工具相比,中国在制造封装设备方面占有更大的份额,这使其在生产芯片贴装和键合等所需工具方面拥有一些经验。<sup>92</sup>

利用其传统封装能力构建先进封装生态系统,为绕过美国出口管制提供了重要机会,而中国确实已经开始这样做了。中国 OSAT 越来越多地转向先进的后端工艺,例如

过去几年,小芯片技术取得了长足进步。中国政府与私营部门合作,也在资助先进封装研究。<sup>93</sup> 例如,2023 年 8 月,中国科技部宣布将资助多达 30 个基于小芯片的项目,为研究提供超过 640 万美元的资金。<sup>94</sup> 地方层面也是如此:2023 年,长电科技和其他中国封装公司的所在地无锡市承诺投资 1400 万美元,打造中国“小芯片谷”,向硅谷致敬。<sup>95</sup>

图 1:2022 年各国组装、测试和制造行业增加值  
2022 年各国组装、测试、  
包装 (ATP)和包装



Varadajan, Raj. “半导体供应链中新兴的弹性。”半导体行业协会,2024 年 5 月,https://web-assets.bcg.com/25/6e/7a123efd40199020ed1b4114be84/emerging-resilience-in-the-semiconductor-supply-chain-r.pdf。

来源:Raj Varadajan 等人,《半导体供应链中新兴的复原力》(波士顿咨询集团和半导体行业协会,2024 年 5 月),https://web-assets.bcg.com/25/6e/7a123efd40199020ed1b4114be84/emerging-resilience-in-the-semiconductor-supply-chain-r.pdf。

中国代工厂和芯片设计公司正在努力将先进的封装方法融入其半导体制造业务。为此,华为通过其子公司海思半导体,已经与封装设备供应商 JT Automation 和晶圆探针卡初创公司 MaxOne Semiconductor 建立了合作伙伴关系,并获得了数百项专利。<sup>96</sup> 2022 年,华为和海思半导体开始创新 3D 芯片堆叠设计,这是一种先进的工艺,涉及将多个晶圆芯片垂直集成到一个封装中,旨在绕过美国的制裁。<sup>97</sup> 2019 年的一份专利申请揭示了一种复杂的设计,它利用了两个芯片,彼此堆叠,但仅部分重叠。<sup>98</sup>

中芯国际是中国最先进的代工厂,自 2021 年以来一直呼吁其他中国公司采用先进封装。<sup>99</sup> 中芯国际经常与华为合作开发芯片(包括封装),最近与华为合作开发了用于华为 Mate 60 Pro 智能手机的 7 纳米 (nm) 麒麟 9000。<sup>100</sup> 长电科技最近还证实其有能力提供 5nm 的封装能力

制造工艺,将 OSAT 与中芯国际实现 5nm 工艺规模生产的努力联系起来。<sup>101</sup>

长江存储是又一家试图利用先进封装技术规避美国法规的中国企业。2022 年,长江存储采用先进封装工艺开发出世界领先的存储芯片。长江存储是中国最大的 NAND 闪存芯片制造商。NAND 闪存是一种无需使用电源即可存储数据的半导体,常用于存储卡和固态硬盘。存储芯片的架构与逻辑芯片不同,其衡量标准是制造过程中产生的层数。美国出口管制禁止向中国出口 128 层或更多层的 NAND 芯片。长江存储 2022 年的 NAND 工艺生产出 232 层的存储芯片,使该公司成为首个突破 200 层里程碑的公司。<sup>102</sup>此外,这种封装架构(称为 Xtacking)采用了混合键合,这是先进封装工艺的标志,表明中国致力于利用封装作为创新手段。<sup>103</sup>

值得注意的是,长江存储的 232 层存储芯片吸引了国内市场以外客户的关注。事实上,美国科技巨头苹果公司计划在 2022 年在中国销售的 iPhone 中使用长江存储的存储芯片。尽管该公司在 2022 年 10 月美国出口管制生效后不久就取消了该计划,但这一事件仍然是中国先进封装技术潜在全球吸引力的一个例子。<sup>104</sup>一些分析师甚至认为,来自中国的廉价生产、先进封装的芯片具有巨大的出口潜力。<sup>105</sup>

中国公司利用先进封装技术规避美国管制的最令人担忧的例子或许是 Jasminer X4,这是一款加密货币挖矿芯片,成功利用了 DRAM-逻辑混合键合技术,这种封装技术涉及将先进的逻辑芯片堆叠在内存芯片上,以提高性能并降低能源需求。虽然中国公司的大多数非单片设计(即结合不同类型芯片的封装)都只是理论上的,但 Jasminer X4 是实践中异构集成的一个案例。事实上,这是 DRAM-逻辑混合键合技术的首次商业应用。这是一种小众异构集成应用,展示了中国工程师绕过美国法规制造高性能芯片的能力。<sup>106</sup>

长江存储和 Jasminer 的例子应该成为华盛顿监管机构的警示信号。美国的出口管制激励了这种规避设计的反制策略,这很可能造就了一代中国创新者,他们试图通过先进的封装技术突破半导体技术的界限。中国企业不再像美国出口管制政策“滑动比例”时代那样抄袭前沿技术,而是被迫发明新技术来规避美国法规。中国商业目标从抄袭到创新的这种隐性文化转变,可能是中美技术竞争的巨大变化。

虽然中国在小芯片生态系统方面投入了巨额资金,但值得注意的是,很少有小芯片设计被制成实体产品,规模化生产仍然是一个障碍。与任何新的半导体制造工艺一样,一个关键挑战是实现高产量。然而,一些行业分析师认为,中国公司可能只是其中之一

距离实现异构集成流程的广泛采用还有三年的时间。<sup>107</sup>

中国企业（包括规模企业和初创公司）以及政府官员都广泛强调先进封装（尤其是小芯片）的前景，认为它可以绕过美国的出口管制。<sup>108</sup>其中一个关键因素是，美国在封装领域并不具备明显的现有优势，因此中国有能力更快地匹敌（甚至超越）美国的能力。

---

中国商业目标从抄袭到创新的这种隐性文化转变，可能会给中美技术竞争带来翻天覆地的变化。

从宏观层面来看，美国激进的经济安全措施可能会损害中国半导体创新扩张的利益，进而损害其旨在保护的行业领先地位。中国在封装领域的进步给美国半导体公司带来了中长期挑战。美国的出口限制无意中刺激了中国公司发明新技术，威胁到全球半导体市场的竞争平衡。

## 4

# 设计出美国先进封装公司

被排除在中国先进封装市场之外的美国公司是

### 证据

与设计创新相比,出口管制的约束更为有限。它要求美国公司在先进封装供应链中占据领先的市场份额,而这对于半导体行业的各个部分(例如工具、设计)来说并不常见。最有力的例子是先进基板市场,特别是碳化硅(SiC)晶片基板,它是电动汽车中使用的宽带隙电力电子半导体的基础。尽管 SiC 基板没有直接受到出口管制的影响,但它提供了一个例子,说明中国与美国半导体投入脱钩如何影响尖端芯片以外的技术领域。

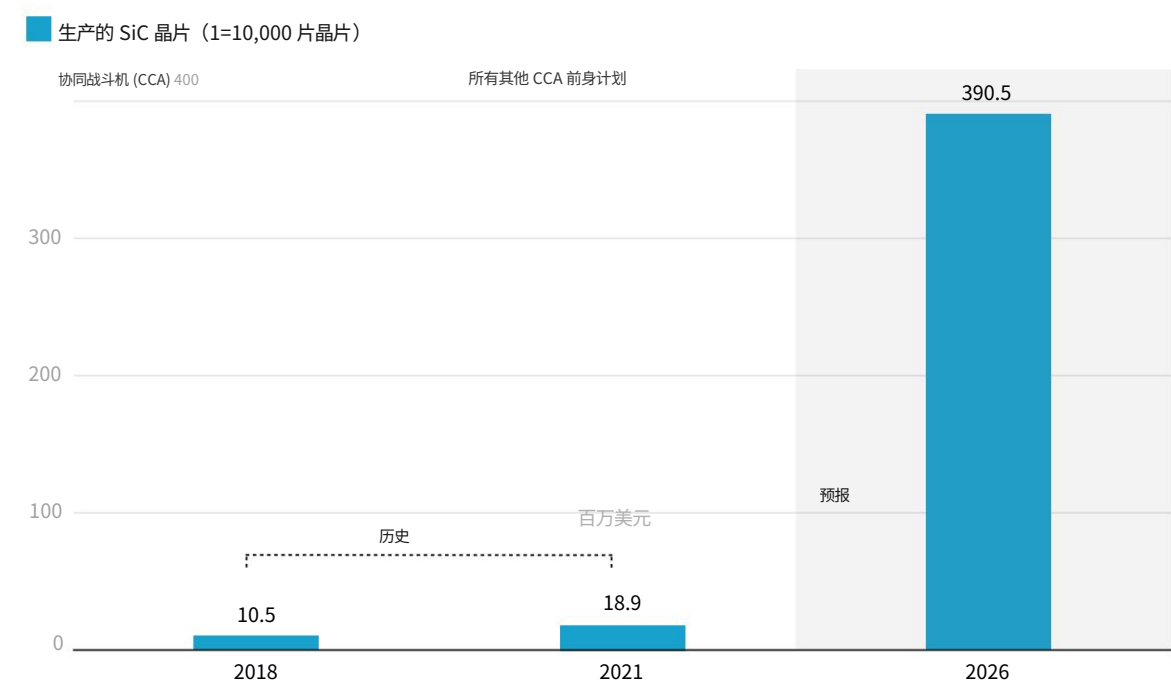
美国公司(尤其是 Wolfspeed 和 Coherent)以及日本的 SiCrystal 目前在全球 SiC 晶圆市场占据主导地位。截至 2021 年,仅总部位于北卡罗来纳州的 Wolfspeed 一家就控制了 60% 以上的市场份额,并率先推动了该行业向 8 英寸晶圆的过渡,这是一项关键的技术突破。与电动汽车逆变器中的硅晶圆相比, SiC 基芯片具有性能优势,因此在汽车行业中的重要性日益提高。中国快速增长的电动汽车制造能力是美国和第三国公司 SiC 晶圆的关键市场。<sup>109</sup>

中国多年来一直致力于扩大 SiC 市场(中国“十四五”规划中提到了 SiC,表明政府将支持 SiC 发展),但最近其努力步伐有所加快。<sup>110</sup>

重点是与中国科学院等重点大学建立公私研究伙伴关系,这有助于中国成为 SiC 专利领域的领导者

申请。111与此同时,比亚迪和蔚来等电动汽车巨头的大量私人资本投资推动了天科蓝星、上汽集团和西安等新兴中国企业的增长。半导体研究公司 Yole Group 的预测表明,未来几年中国 SiC 产量可能会大幅增加:2021 年 SiC 晶圆产量为 18 万片,而 2026 年预测将增加到 390 万片。

2018-2026 年中国 SiC 晶圆制造历史及规划  
图 2.2018 - 2026 年中国 SiC 晶圆制造历史 and 计划



资料来源:AJ Cortese,“这就是 SiC:中国旨在掌握一款你从未听说过的电动汽车芯片”,MacroPolo,2024 年 1 月 2 日, <https://macropolo.org/analysis/sic-china-ev-chip/>。  
资料来源:数据来自 Yole Group,通过 Cortese, AJ 访问,2022 年。“这就是 SiC:中国旨在掌握一款你从未听说过的电动汽车芯片” MacroPolo。"MacroPolo。2022 年 9 月 8 日。<https://macropolo.org/analysis/sic-china-ev-chip/>

虽然到目前为止,美国公司在 SiC 市场份额方面仍保持着领先地位,但在政府支持下,中国竞争对手的崛起预计将在未来带来更多挑战。112中国在电动汽车制造和将 SiC 基封装集成到电力电子系统方面的领导地位也具有优势,这提供了强大的需求来源和技术知识,从而实现了与国内 SiC 基板供应商的创新合作。113总体而言,这个设计示例展示了中国如何采取“全供应链”方式来取代美国及其盟友的半导体技术,而这一进程在 2022 年 10 月的出口管制之后才有加速。

# 5

## 概括

### 当今先进封装的现状

政策制定者和企业将封装创新放在首位并取得了重大进展,美国 and 世界各地也在做出类似的努力。这些努力包括增加私营部门在芯片和先进基板等领域的研发,以及产业政策投资,例如美国的《CHIPS法案》。如上所述,中国拥有一些现有优势——即国内传统封装产能大,并在电动汽车和太阳能电池板等宽带隙半导体下游应用制造方面处于领先地位。话虽如此,中国在开发先进封装方面并非全盘托出,而且其在该领域的长期领导地位也绝非板上钉钉。

台湾目前被认为是先进封装领域的全球领导者,这主要归功于台积电领先的 CoWoS 产品,以及台湾重要的国内设备和封装材料供应商生态系统。<sup>114</sup>台积电的能力取决于与 Nvidia 和 AMD 等美国无晶圆厂公司在系统设计方面的密切合作(将在未来的设计论文中详细讨论),其 Hopper H200 和 Ryzen-16 核心封装分别是主要的市场领导者。<sup>115</sup>在 OSAT 竞争方面,美国的 Amkor 和台湾的 ASE 在先进封装方面保持着对中国大陆长电科技和通富科技的技术优势。<sup>116</sup>随着全球经济的不断增长,主要的 OSAT 也越来越多地将生产从中国大陆转移到东南亚等地区。

中美紧张局势。<sup>117</sup>

尽管如此,中国在先进封装领域取得的最新进展不容小觑。中外观察人士普遍认为,美国的出口限制已经加速了



中国先进封装生态系统创新的时间表。<sup>118</sup> 中国对先进封装的投资规模巨大,反映了政府对该领域的高度重视,该领域被确定为中国在 2022 年 10 月之前超越美国的机会。最重要的是,与半导体生态系统的大多数其他领域不同,美国和中国在封装方面处于相似的“起跑线”。两国能否长期取得封装行业领导地位,可能在很大程度上取决于 OSAT、IDM、设计者和 EDA 公司、代工厂和原始设备制造商等众多参与者之间的有效协调。在这方面,中国整个半导体 (和电子制造)生态系统为应对美国管制而日益密切的合作,可能为中国带来另一个优势。<sup>119</sup>

---

## 中外观察人士普遍认为,美国的出口限制加速了中国先进封装生态系统的创新时间表。

未来半导体行业的发展将主要由晶体管密度推动,还是由先进封装创新等系统复杂性的变化推动,还有待观察。<sup>120</sup> EUV 光刻等领域 (该技术的使用权由美国及其盟友控制)可能仍对 PPAC 改进至关重要,这意味着美国公司使用这些技术的能力仍然使美国公司在与中国的整体芯片竞赛中占据优势,而中国仍在努力开发国内替代品。然而,先进封装能力和先进制造工具的结合是美国及其盟友保持半导体领先地位最有希望的方式。因此,美国不能让中国在先进封装领域遥遥领先,即使它在其他领域继续领先。

## 6

# 结论与政策 建议

尽可能地保持技术领先,而不是简单地领先对手一步。这一战略引发了北京的一系列反制措施,美国对半导体出口管制的新方法试图扩大其

包括设计外包和规避设计。从长远来看,两者都有可能严重影响美国芯片生态系统。本文重点关注先进封装,这为中国半导体行业提供了一个难得的机会,可以利用供应链环节中的现有优势,避免使用美国及其盟友的芯片制造技术,实现跨越式发展。

在创新方面处于领先地位。

据报道,美国正在考虑针对先进封装技术实施新的出口管制,但这可能无助于解决这个问题,因为前面提到的挑战包括该行业的准入门槛低于芯片制造设备、全球供应链分布广泛以及中国现有设施和技术  
的广泛性。<sup>121</sup>事实上,管制可能会对寻求在先进封装领域发展的美国行业参与者造成比阻碍中国竞争对手更大的伤害。因此,美国对中国封装技术进步最有效的直接回应可能是“促进”经济安全,而不是“保护”。

虽然包装行业的低利润率和劳动强度传统上使美国的投资缺乏吸引力,但随着先进包装附加值的增加和工厂自动化的扩大,这些因素正在发生变化。<sup>122</sup>推动美国包装行业增长的一项有希望的政府努力是国家先进包装制造计划 (NAPMP),这是美国国家标准与技术研究所根据《CHIPS 法案》发起的一项举措,将投资 16 亿美元用于资助

包括小芯片在内的五个封装研发领域的创新。<sup>123</sup> CSIS 的另一篇论文概述了进一步推动这些努力的潜在战略,包括允许流程变更以开发制造基地、劳动力发展计划和进一步的公私合作伙伴关系。<sup>124</sup>

虽然封装技术在本土化的增加可能不会导致美国控制封装领域的关键瓶颈,但它可以降低国内和盟国公司被中国更先进的封装技术取代的风险。这也可以防止中国公司通过引领先进封装协议和技术标准的全球制定来锁定未来的封装领导地位,这可能会影响先进封装技术的采用。<sup>125</sup>

中国在先进封装领域的主要目标 (以及已经实现的成就)是围绕美国对先进芯片和相关制造设备的控制进行设计。在芯片等领域的投资可能很快会使一系列中国电子系统具备处理、功率和成本能力,而这些能力曾经只有使用尖端光刻工具和投入才能实现

这些技术主要由美国及其盟国开发和控制。美国本身并不是包装领域的领军者,因此无法有效减缓中国在该领域的崛起。

更广泛层面上的潜在政策转变是恢复半导体出口管制的滑动比例制。这一方法打消了相关国家投入大量时间和金钱来发展自身能力以试图超越美国及其盟友的积极性。滑动比例战略让对手不断获得新技术 尽管这些新技术比美国落后一到两代。美国新采取的“硬上限”出口管制方法激励受影响的国家和企业进行创新,摆脱对美国及其盟友投入的依赖。公平地说,这种转变对中国来说并不是那么明显。长期以来,中国一直在寻求提高技术独立性 甚至在美国及其盟友收紧经济安全规则之前。然而,过去两年出口管制施加的硬上限无疑将中国的努力推上了一个新台阶。

---

## 美国新采取的“硬上限”出口管制措施激励受影响的国家和企业进行创新,摆脱对美国及其盟友投入的依赖。

然而,从政治角度来看,恢复原有的滑动比例方法可能不可行 更重要的是,它可能无法扭转对美国行业利益造成的损害。当前出口管制最显著的影响不是中国新发现的先进封装本土能力。相反,这是中国行业和政府思维模式的转变,即外国投入 (尤其是美国投入)不再可靠,因为它们的供应没有保障。美国日益将经济和国家安全混为一谈,这意味着尖端关键产品总是容易受到管制,这使得它们对中国买家的吸引力降低。

因此,从扭转中国的设计退出和规避设计努力的角度来说,通过取消对持续教育与培训相关项目的管制来调整政策差距可能为时已晚。

“大船已起航”这一想法不应被用作向中国野心屈服的理由,也不应被用作扩大对成熟和基础技术(如传统芯片、封装或任何具有大量外国产能的半导体技术)的控制的借口。此类控制将扼杀国内产业,压倒 BIS 的能力,并加剧中国与 CET 相关的思维转变。减少对美国企业影响的替代策略将在一份关于半导体制造设备的报告中更详细地讨论,其中包括半导体出口管制的更多多边化,这可能需要更严格地关注某些“瓶颈”技术,并排除内存芯片等领域。

与此同时,政策制定者可以加倍努力弥补美国产业因设计外包和规避设计而面临的不可避免的损失,例如中国在先进封装方面的发展可能会导致美国资本设备和芯片的购买量减少。这些努力应包括,例如,美国与其合作伙伴和盟友之间加强合作,以协调国家主导的投资以及制造业扩张和联合研发项目等努力。这些努力还可以包括一项更雄心勃勃的贸易政策,以确保美国公司能够在全球范围内接触到更多的客户,这有助于弥补中国境内失去的商业机会。

# 关于作者

杰克·惠特尼曾是 CSIS Scholl 国际商业主席的研究实习生,也是安永帕特农公司政府和公共部门的战略顾问。在安永帕特农公司,他的工作重点是帮助联邦政府客户了解中美技术竞争、识别美国关键行业供应链中的漏洞以及设计公私融资伙伴关系。杰克之前的工作经验包括为领先的私募股权基金进行商业尽职调查和为财富500 强企业进行企业战略评估。他拥有威廉姆斯学院的哲学学士学位。

Matthew Schleich曾任 CSIS 国际问题研究中心 Scholl Chair 的研究助理

商业。他目前担任美国国务院国际安全和不扩散局的外交事务官员。在 CSIS,他的研究以经济安全为中心,特别关注美国出口管制政策的发展。他曾担任《世界出口管制评论》的特约记者,并在美国贸易代表办公室和美国国务院实习。Schleich 拥有约翰霍普金斯大学高级国际研究学院的国际关系硕士学位和冈萨加大学的经济学学士学位。

William Alan Reinsch是 CSIS 的 Scholl 国际商务教授。此前,他曾担任 Kelley, Drye & Warren 律师事务所的高级顾问,并担任美国国家对外贸易委员会主席 15 年,该委员会代表跨国公司处理国际贸易和税收政策问题。2001 年至 2016 年,他同时担任中美经济与安全审查委员会成员。他还是

马里兰大学公共政策学院,教授贸易政策和政治课程。

赖因施还曾在克林顿政府期间担任商务部出口管理副部长。在此之前,他在国会山工作了 20 年,其中大部分时间担任已故参议员约翰·海因茨 (John Heinz) (宾夕法尼亚州共和党人) 的高级立法助理,随后担任参议员约翰·D·罗斯福 (John D. Roth) 的高级立法助理。

洛克菲勒四世 (西弗吉尼亚州民主党议员)。他分别拥有约翰霍普金斯大学和约翰霍普金斯大学高级国际研究学院的国际关系学士和硕士学位。

## 尾注

- 1 Paul Mozur 和 Ana Swanson,《中国科技公司被禁止购买美国零部件》,《纽约时报》,2018年4月16日,<https://www.nytimes.com/2018/04/16/technology/chinese-tech-companies-blocked-from-buying-american-components.html>; Jeb Su,“美国出口禁令如何有效让中国电信巨头中兴通讯破产:分析”,《福布斯》,2018年4月17日, <https://www.forbes.com/sites/jeanbaptiste/2018/04/17/美国出口禁令如何有效地使中国电信巨头中兴通讯破产/>。
- 2 莫祖尔 (Paul Mozur) 和钟雷蒙德 (Raymond Zhong),《特朗普在贸易问题上态度大转变,誓言保护中兴通讯在华就业岗位》,《纽约时报》,2018年5月13日,<https://www.nytimes.com/2018/05/13/business/trump-vows-to-save-jobs-at-chinas-zte-lost-after-us-sanctions.html>。
- 3 白宫,“国家安全顾问杰克·沙利文在特别竞争研究项目全球新兴技术峰会上的讲话”,2022年9月16日, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/speeches-remarks/2022/09/16/remarks-by-national-security-advisor-jake-sullivan-at-the-special-competitive-studies-project-global-emerging-technologies-summit/>。
- 4 Sujai Shivakumar、Charles Wessner 和 Thomas Howell,《巨大转变:美国新的半导体出口管制及其对美国企业、盟友和创新生态系统的影响》(华盛顿特区:CSIS,2022年11月),<https://www.csis.org/analysis/seismic-shift-new-us-semiconductor-export-controls-and-implications-us-firms-allies-and#:~:text=%E2%80%99sliding%20scale%E2%80%99%20approach>。
- 5 William Alan Reinsch、Matthew Schleich 和 Thibault Denamiel,“深入了解美国半导体出口管制更新”,CSIS,关键问题,2023年10月20日,<https://www.csis.org/analysis/in-sight-us-semiconductor-export-controls-update>。
- 6 Karen Freifeld,“独家:美国对外国芯片设备出口到中国的新规定将为部分盟友提供豁免”,路透社,2024年7月31日,<https://www.reuters.com/technology/new-us-rule-foreign-chip-equipment-exports-china-exempt-some-allies-sources-say-2024-07-31/>。



- 7 Aadil Brar, “中国华为是否打破了美国芯片控制?” 《新闻周刊》, 2023 年 10 月 4 日, <https://www.newsweek.com/china-us-semiconductor-technology-export-controls-huawei-1831739>。
- 8 程廷芳, “中国科技野心如何突破美国出口管制网”, 日经亚洲, 2023 年 10 月 20 日, <https://asia.nikkei.com/Business/Business-Spotlight/How-China-s-tech-ambitions-slip-through-the-US-export-control-net>; Ian King 和 Debby Wu, “贸易组织警告称, 华为正在建立秘密芯片网络”, 彭博社, 2023 年 8 月 23 日, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-08-23/huawei-building-secret-chip-plants-in-china-to-bypass-us-sanctions-group-警告>; Dylan Patel, Afzal Ahmad 和 Myron Xie, “中国人工智能与半导体崛起: 美国制裁失败”, SemiAnalysis, 2023 年 9 月 12 日, <https://www.semianalysis.com/p/china-ai-and-semiconduc-tors-rise>; James Titcomb, “中国购买创纪录数量的微芯片套件以击败拜登制裁”, The Telegraph, 2024 年 1 月 22 日, <https://finance.yahoo.com/news/china-stockpiles-40bn-micro-chip-kit-135319882.html?guccounter=1>。目前几乎没有公开数据可以证实中国半导体技术客户是否在技术使用方面误导美国及其盟友供应商, 但行业分析师表示, 中芯国际进口了美国工具, 并声称这些工具被用于不如实际情况先进的芯片生产。
- 9 Che-Jen Wang, “中国绕过美国人工智能芯片限制的 4 种方法”, 《外交家》, 2024 年 6 月 28 日, <https://thediplomat.com/2024/06/4-ways-china-gets-around-us-ai-chip-restrictions/>; Paul Triolo, “中国半导体产业的新时代: 北京回应出口管制”, 《美国事务杂志》第 8 卷, 第 1 期 (2024 年春季): 第 29–52 页, <https://americanaffairsjournal.org/2024/02/a-new-era-for-the-chinese-semiconductor-industry-beijing-responds-to-export-controls/>。
- 10 Paul Triolo, 《中国半导体产业的未来》, 《美国事务杂志》第 5 卷, 第 1 期 (2021 年春季): 90–113, <https://americanaffairsjournal.org/2021/02/the-future-of-chinas-semiconductor-industry/>。
- 11 Liza Lin, “中国加大力度 ‘从其技术领域删除美国’”, 《华尔街日报》, 2024 年 3 月 7 日, <https://www.wsj.com/world/china/china-technology-software-delete-america-2b8ea89f>。
- 12 方励之, “拜登: ‘我们正在与中国竞争, 以赢得 21 世纪’”, 日经亚洲, 2021 年 4 月 29 日, <https://asia.nikkei.com/Politics/International-relations/Biden-s-Asia-policy/Biden-We-are-in-a-com-petition-with-China-to-win-the-21st-century>。
- +三 Eduardo Baptista, “中国习近平呼吁在美国紧张局势下实现科技自力更生”, 路透社, 2023 年 2 月 22 日, <https://www.reuters.com/world/china/chinas-xi-calls-technological-self-reliance-amid-tension-with-us-2023-02-22/>。
- 14 Anton Shilov, “中国将向芯片制造商提供 270 亿美元以应对美国制裁 大基金 III 将进行进一步融资”, Tom's Hardware, 2024 年 3 月 9 日, <https://www.tomshardware.com/tech-industry/china-to-give-chipmakers-dollar27-billion-to-counter-us-sanctions>。
- 15 林, “中国加大力度。”
- 16 Mackenzie Hawkins, Ian King, Cagan Koc 和 Takashi Mochikuzi, “美国出台更严格的贸易规则以遏制中国芯片行业”, 彭博社, 2024 年 7 月 16 日, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-07-17/us-considers-tougher-trade-rules-against-companies-in-chip-crackdown-on-china>。本分析侧重于先进封装技术, 不会涉及第三国公司填补美国公司留下的中国供应缺口的例子。研究表明, 美国公司并未深入参与中国先进封装业务。因此, 没有足够的证据证明第三国的出口正在一对一地取代美国在中国的先进封装技术。在本系列的后续论文中, Scholl Chair 将讨论美国公司在半导体供应链中处于全球领先地位的领域。在这些子行业 (尤其是半导体制造设备) 中, 有证据表明美国公司正在被设计淘汰。

供应链中的新兴市场不仅被中国供应商所取代,而且还被来自第三国的机会主义企业所取代,这些企业试图填补美国在华存在感下降所留下的需求缺口。

- 17 Jingyue Hsiao, “尽管有出口禁令,中国蓬勃发展的半导体设备市场仍吸引外国公司”,《DIGITIMES Asia》,2023 年 11 月 8 日, <https://www.digitimes.com/news/a20231108VL205.html>;以及 Monica Chen 和 Jessie Shen, “台湾晶圆厂工具制造商从中国获得 LTA”,DIGITIMES Asia,2023 年 5 月 25 日,<https://www.digitimes.com/news/a20230524PD217/taiwan-mature-process-fab-equipment-china-ic-manufacturing.html>。
- 18 Hideki Tomoshige, “美国和日本对华先进半导体出口管制仍存在关键差异”,CSIS,博客文章, 2023 年 5 月 25 日,<https://www.csis.org/blogs/perspectives-innovation/key-differences-remain-between-us-and-japanese-advanced-semiconductor>。
- 19 Cagan Koc 和 Takashi Mochizuki, “ASML、东京电子暂时回避美国新芯片出口规定”,彭博法律,2024 年 7 月 31 日,<https://news.bloomberglaw.com/international-trade/asml-tokyo-electron-shielded-from-us-chip-export-rules-for-now>。
- 20 William Alan Reinsch、Thibault Denamiel 和 Eric Meyers, 《优化关键和新兴技术的出口管制:审查管制清单、扩展规则和涵盖项目》(华盛顿特区:CSIS,2023 年 11 月),<https://www.csis.org/analysis/optimizing-export-controls-critical-and-emerging-technologies-reviewing-control-lists>。
- 21 Larry Sussman, 《Seagate 的 3 亿美元教训》,WireScreen,2024 年 1 月 26 日, <https://wirescreen.ai/blog/FDPR>
- 22 楼先英、戴孟浩、姚爽、冉福燕, “美国半导体新出口管制规则概述”,Lexology,2022 年 11 月 9 日,<https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=84c-1d0ec-e271-41f6-bf70-f99526994458>。
- 23 彭博新闻社, “拜登将中国实体列入黑名单的记录超越特朗普”,彭博社,2024 年 4 月 11 日,<https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-04-12/biden-surpasses-trump-s-record-for-blacklisting-chinese-entities>。
- 24 Larry Sussman, “通过供应链监管人工智能”,WireScreen,2024 年 4 月 10 日,<https://wirescreen.ai/blog/ai-supply-chain-regulation>。
- 二十五 同上。
- 26 Ulrike Jasper, “美国出口管制:更新并帮助解决‘最低限度’问题”,AEB,2022 年 5 月 27 日, <https://www.aeb.com/en/magazine/articles/us-export-controls-de-minimis.php>。
- 27 “最低限度规则和指南”,工业和安全局,2019 年 11 月 5 日, <https://www.bis.doc.gov/index.php/documents/pdfs/1382-de-minimis-guidance/file>。
- 28 同上。
- 29 Shunsuke Tabeta, “尽管盈利疲软,但中国的中芯国际和芯片行业仍增加研发投入”,日经亚洲,2023 年 9 月 12 日,<https://asia.nikkei.com/Business/Tech/Semiconductors/China-s-SMIC-chip-sector-boost-RD-spending-despite-weak-earnings>。
- 30 Anton Shilov, “华为转向 3D 芯片堆叠,可能规避美国制裁”,Tom's Hardware,2022 年 4 月 21 日,<https://www.tomshardware.com/news/huawei-patents-stacked-chip-design-method-without-tsvs>。
- 31 米特·罗姆尼, “罗姆尼主持参议院听证会讨论加强出口管制执法”,记录,2024 年 4 月 10 日,<https://www.romney.senate.gov/romney-leads-senate-hearing-on-strengthening-export-controls-enforcement/>。

32 Shivakumar 等人,《地震转变》。

33 同上。

34 Fanny Potkin 和 Yelin Mo,“美国加强限制,中国芯片设备制造商抢占市场份额”,  
路透社,2023 年 10 月 18 日,<https://www.reuters.com/technology/chinese-chip-equipment-makers-grab-market-share-us-tightens-curbs-2023-10-18/>;以及“日本的半导体工具制造商正在蓬勃发展”,  
经济学人,2024 年 2 月 15 日,<https://www.economist.com/business/2024/02/15/japans-semiconductor-toolmakers-are-booming>。

35 Mercy A. Kuo,《中国半导体产业现状》,《外交家》,2023 年 10 月 2 日,<https://thediplomat.com/2023/10/the-state-of-chinas-semiconductor-industry/>。

36 Matteo Crosignani,Lina Han,Marco Macchiavelli 和 André F. Silva,“地缘政治风险与脱钩:来自美国出口管制的证据”,  
纽约联储储备银行工作人员报告,第 1096 号,2024 年 4 月,<https://doi.org/10.59576/sr.1096>。

37 Kyriakos Petrakakos,“美国半导体出口管制实际上可能让中国占据优势”,《中国计划》,2023 年 6 月 15 日,<https://thechinaproject.com/2023/06/15/semiconductor-export-controls-a-catalyst-for-chinese-development/>。

38 Harald Bauer 等人,“从半导体研发中获得更多收益”,麦肯锡公司,2011 年,[https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client\\_service/semiconductors/pdfs/mosc1rd.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/semiconductors/pdfs/mosc1rd.ashx);Kif Leswing,“英特尔曾主导美国芯片行业。现在它正努力保持相关性。”,  
NBC News,2024 年 4 月 26 日,<https://www.nbcnews.com/business/business-news/intel-used-dominate-us-chip-industry-now-struggling-stay-relevant-rcna149601>。

三十九 Sujai Shivakumar,《确保创新和增长的全球标准》(华盛顿特区:CSIS,2022 年 1 月),<https://www.csis.org/analysis/securing-global-standards-innovation-and-growth>。

40 同上。

41 白宫,《美国政府关键和新兴技术国家标准战略》(华盛顿特区:白宫,2023 年 5 月),<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/05/US-Gov-National-Standards-Strategy-2023.pdf>。

42 同上。

43 Jane Lee 和 Eduardo Baptista,“芯片大战:小芯片如何成为中国科技战略的核心部分”,  
路透社,2023 年 7 月 13 日,<https://www.reuters.com/technology/chip-wars-how-chiplets-are-emerging-core-part-chinas-tech-strategy-2023-07-13/>。

44 John VerWey,“中国半导体产业政策:过去和现在”,美国国际贸易委员会,《国际商业与经济杂志》1(2019 年):<https://www.usitc.gov/publications/332/期刊/中国半导体工业政策过去和现在的情况.pdf>。

45 “SIA 白皮书:盘点中国半导体产业”,半导体行业协会,2021 年 7 月,[https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/07/Taking-Stock-of-China%E2%80%99s-Semiconductor-Industry\\_final.pdf](https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/07/Taking-Stock-of-China%E2%80%99s-Semiconductor-Industry_final.pdf);中华人民共和国国务院,《国务院关于发布<中国制造 2025>的通知》,安全与新兴技术中心译,2022 年 3 月 10 日,<https://cset.georgetown.edu/publication/notice-of-the-state-council-on-the-publication-of-made-in-china-2025/>。

46 Triolo,“中国半导体产业”。

- 47 Gregory C. Allen,《中国发动微芯片技术战争的新战略》(华盛顿特区:CSIS,2023年5月), <https://www.csis.org/analysis/chinas-new-strategy-waging-microchip-tech-war#:~:text=In%202018年4月,美国宣布放弃这一计划。>
- 48 Peter Ellstrom 和 Allen Wan,“中国秘密将华为转变为最强大的芯片战争武器”,彭博社,2023年12月1日,<https://www.bloomberg.com/graphics/2023-china-huawei-semicon-ductor/>。
- 49 Liza Lin、Stu Woo 和 Raffaele Huang,“美国想打倒华为。它只会变得更强大”,《华尔街日报》,2024年7月29日,<https://www.wsj.com/business/telecom/huawei-chi-na-technology-us-sanctions-76462031>;以及 Mackenzie Hawkins,“美国考虑制裁华为秘密的中国芯片网络”,彭博社,2024年3月20日,<https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-03-20/us-weighs-sanctioning-huawei-s-secretive-chinese-chip-network>。
- 50 Ana Swanson,“拜登政府限制中国获取芯片技术”,《纽约时报》,2022年10月7日,<https://www.nytimes.com/2022/10/07/business/economy/biden-chip-technology.html>;以及 Triolo,“中国半导体产业”。
- 51 摘自 2024年7月25日与半导体行业参与者举办的 CSIS 圆桌讨论和分析师。
- 52 基于作者对半导体行业专家的采访,2024年3月至2024年4月。
- 53 国务院国有资产监督管理委员会改革局,《关于开展对标世界一流企业价值创造对标工作的通知》,安全与新兴技术中心译,2024年4月8日, <https://cset.georgetown.edu/publication/china-files-79-2022/>。
- 54 Lin,“中国加大力度”。
- 55 Arjun Kharpal,“北京寻求半导体自力更生,中国芯片设备公司收入激增”,CNBC,2023年9月28日,<https://www.cnbc.com/2023/09/28/chinas-chip-firms-see-revenue-surge-as-beijing-seeks-self-reliance.html>。
- 56 Eduardo Jaramillo,“北京希望拥有自己的 EUV 光源,这是芯片供应链的关键部分”,Chi-na Project,2023年8月3日,<https://thechinaproject.com/2023/08/03/beijing-pushes-china-to-develop-its-own-euv-light-source-a-key-part-of-chip-making-tech/>; Cheng Ting-Fang 和 Shunsuke Tabeta,“中国顶级芯片制造商中芯国际和长鑫存储力争放弃外国投入”,日经亚洲,2024年5月21日, <https://asia.nikkei.com/Business/Tech/Semiconductors/Top-China-chipmakers-SMIC-and-CXMT-push-to-scrap-foreign-inputs>。
- 57 路透社,“消息人士称,美国限制前中国摩尔线程融资价值 34 亿美元”,2023年11月16日,<https://www.reuters.com/technology/chinas-moore-threads-valued-34-bln-funding-before-us-curbs-sources-2023-11-16/>; John Shiffman 和 Joshua Schneyer,“美国希望遏制中国芯片产业。这家初创公司表明这并不容易”,路透社,2023年12月29日, <https://www.reuters.com/technology/us-wants-contain-chinas-chip-industry-this-startup-shows-it-wont-be-easy-2023-12-29/>; Amanda Liang 和 Judy Lin,“得益于 3,451 家本土 IC 设计公司的支持,中国国内 EDA 市场份额翻倍”,DIGITIMES Asia,2024年4月25日, <https://www.digitimes.com/news/a20240424PD211.html>。
- 58 Zeyi Yang,“中国为何大举押注 Chiplet”,《麻省理工技术评论》,2024年2月6日, <https://www.technologyreview.com/2024/02/06/1087804/china-betting-on-chiplets-packaging/>。
- 59 Sujai Shivakumar 和 Chris Borges,《先进封装和摩尔定律的未来》,CSIS, Critical 问题,2023年6月26日, <https://www.csis.org/analysis/advanced-packaging-and-future-moores-law>。

- 60 半导体制造的后端阶段通常称为组装、测试和封装 (ATP)。如前所述,测试在有关半导体制造设备的单独报告中介绍。组装和封装通常可以互换使用,有时归类为组装的技术 (例如键合和切割工具)通常包含在先进封装的讨论中。由于这种重叠,本文使用术语封装来指代封装和组装技术。
- 61 “Allegro X 高级封装设计平台”,Cadence, [https://www.cadence.com/en\\_US/home/tools/ic-package-design-and-analysis/ic-package-design/allegro-x-advanced-designer.html](https://www.cadence.com/en_US/home/tools/ic-package-design-and-analysis/ic-package-design/allegro-x-advanced-designer.html);以及 Synopsys, “Synopsys 和 TSMC 利用晶圆上芯片和集成扇出认证设计流程加速 2.5D/3DIC 设计”,新闻稿,2020 年 8 月 25 日, <https://news.synopsys.com/2020-08-25-Synopsys-and-TSMC-utilize-wafer-chip-and-integrated-fan-out-certification-design-process-to-accelerate-2.5D-3DIC-design>。
- 62 “摩尔定律”,英特尔,2023 年 9 月 18 日,<https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/re-source/moores-law.html#gs.5teqzh>。
- 63 Matt Traverso,《节点换个名字:晶体管尺寸与摩尔定律》,《预测》,2023 年 7 月 10 日, <https://medium.com/predict/a-node-by-any-other-name-transistor-size-moores-law-b770a16242e5>;以及 R. Clark 等人的《观点:未来设备和扩展所需的新工艺技术》,APL Materials 6,第 5 期 (2018 年 5 月 29 日):058203, <https://doi.org/10.1063/1.5026805>。
- 64 Traverso,“节点的别称”。
- 65 按照这一定义的严格解释,一些行业分析师认为,几十年前,随着不同应用领域出现了不同的芯片尺寸,摩尔定律已经失去意义。然而,如今,摩尔定律更常被用来指代晶体管密度等因素,而与晶圆尺寸无关。
- Synopsys 创始人兼执行主席 Aart de Geus 使用“SysMoore 时代”一词来描述摩尔定律晶体管数量增加与系统复杂性增加 (例如先进封装)的不断融合,从而推动当今芯片行业的性能提升。
- 66 同上。
- 67 Audrey Woods,“摩尔定律的消亡:其意义何在以及未来如何填补这一空白”,MIT CSAIL Alliances,<https://cap.csail.mit.edu/death-moores-law-what-it-means-and-what-might-fill-gap-going-forward>;Harald Bauer、Jan Veira 和 Florian Weig,“摩尔定律:废除还是复兴?”,麦肯锡公司,2013 年 12 月,[https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Semiconductors/Our%20Insights/Moores%20law%20Repeal%20or%20renewal/Moores\\_law\\_Repeal\\_or\\_renewal.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Semiconductors/Our%20Insights/Moores%20law%20Repeal%20or%20renewal/Moores_law_Repeal_or_renewal.pdf);以及 David Rotman,“我们还没有为摩尔定律的终结做好准备”,《麻省理工技术评论》,2020 年 2 月 24 日,<https://www.technologyreview.com/2020/02/24/905789/were-not-prepared-for-the-end-of-moores-law/>。
- 68 Joseph Fitzgerald 等人,“先进封装正在彻底重塑芯片生态系统”,波士顿咨询集团,2024 年 5 月 14 日,<https://www.bcg.com/publications/2024/advanced-packaging-is-reshaping-the-chip-industry>。
- 69 Saif M. Khan,“半导体供应链”,安全与新兴技术中心,2021 年 1 月, <https://cset.georgetown.edu/publication/the-semiconductor-supply-chain/>。
- 70 Nirmalya Maity,“即使经典摩尔定律的扩展速度放缓,异构设计和先进封装仍能推动 PPACtM 取得进步”,应用材料,2021 年 9 月 2 日,<https://www.appliedmaterials.com/us/en/blog/blog-posts/heterogeneous-design-and-advanced-packaging-enable-advances-in-ppact-even-as-classic-moores-law-scaling-slows.html>。

- 71 Ondrej Burkacky, Taeyoung Kim 和 Inji Yeom, “先进芯片封装:制造商如何取胜”, 麦肯锡公司, 2023 年 5 月 24 日, <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/advanced-chip-packaging-how-manufacturers-can-play-to-win>。
- 72 同上。
- 73 Santosh Kumar, 《先进封装的当前趋势与挑战》, 半导体行业协会, 2020 年 9 月, [https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2020/09/Santosh-Kumar\\_Yole\\_Advanced-Packaging-Current-Trends-and-Challenges.pdf](https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2020/09/Santosh-Kumar_Yole_Advanced-Packaging-Current-Trends-and-Challenges.pdf)。
- 74 Christian Davies 和 Qianer Liu, 《芯片制造商为何要向‘先进封装’投资数十亿美元》《金融时报》, 2024 年 4 月 24 日, <https://www.ft.com/content/19710eda-b4c3-488b-a42a-1c6b25c18a12>。
- 75 “关于 Chiplet 技术的一切”, Cadence, 2023 年 11 月 29 日, <https://resources.pcb.cadence.com/博客/2023-关于小芯片技术的一切>。
- 76 同上。
- 77 Khan, “半导体供应链”。
- 78 “混合键合”, 应用材料, <https://www.appliedmaterials.com/us/en/semiconductor/market-trends-and-inflections/heterogeneous-integration/hybrid-bonding.html>。
- 79 Dylan Patel, Myron Xie 和 Jeff Koch, “混合键合工艺流程 先进封装第 5 部分”, SemiAnalysis, 2024 年 2 月 9 日, <https://www.semianalysis.com/p/hybrid-bonding-process-flow-advanced>; 以及 “混合键合基础 什么是混合键合?”, Brewer Science, 2022 年 7 月 28 日, <https://blog.brewerscience.com/what-is-hybrid-bonding>。
- 80 Marko Radosavljevic 和 Jack Kavalieros, “3D 堆叠 CMOS 将摩尔定律推向新高度”, IEEE Spectrum, 2022 年 8 月 11 日, <https://spectrum.ieee.org/3d-cmos>。
- 81 “高端性能封装: 3D/2.5D 集成 2020 市场和技术报告”, Yole Group, 2020 年 11 月, <https://medias.yolegroup.com/uploads/2020/11/YDR20153-High-end-performance-packaging-2020-Sample.pdf>。
- 82 “供应链探索者: 先进芯片”, 新兴技术观察站, 最新更新于 2017 年 10 月 16 日 2022 年, <https://chipexplorer.eto.tech/>。
- 83 “投资者介绍”, Besi, 2023 年 11 月, [https://www.besi.com/fileadmin/data/Investor\\_Relations/投资者演示/投资者演示\\_2023 年 11 月.pdf](https://www.besi.com/fileadmin/data/Investor_Relations/投资者演示/投资者演示_2023年11月.pdf)。
- 84 “我们是谁”, ASMPT, <https://www.asmpt.com/>; 以及 “投资者关系”, Kulicke & Soffa, <https://investor.kns.com/>。
- 85 Patel 等人, “混合键合工艺流程”; Anton Shilov, “台积电将通过到 2026 年每年增长 60%”, AnandTech, 2024 年 5 月 21 日, <https://www.anandtech.com/show/21405/tsmc-to-expand-cowos-capacity-by-60-every-year-through-2026>。
- 86 “硅晶圆是什么? 它有什么用途?”, WaferPro, 2024 年 1 月 4 日, <https://waferpro.com/what-is-silicon-wafer/>。
- 87 “宽带隙半导体: 兑现承诺”, 美国能源部, 2013 年 4 月, <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/wide-bandgap-semiconductors-pursuing-promise>。
- 88 Yik Yee Tan, “先进封装和 IC 基板的现状”, Yole Group, 2022 年 3 月 8 日, <https://medias.yolegroup.com/uploads/2023/03/edtm-2023-yg-presentation-slide.pdf>; 以及 Bilal Hachemi, 《AI 加速器和 HPC: 先进 IC 载板市场的最新创新》, Yole Group, 2023 年 3 月 14 日



2024 年, <https://www.yolegroup.com/strategy-insights/ai-accelerators-and-hpc-latest-innovations-in-the-advanced-ic-substrates-market/>。

89 Jane Lanhee Lee, Jan King, Mackenzie Hawkins 和 Jillian Deutsch, “中美芯片冲突开辟新战线”, 彭博社, 2023 年 11 月 20 日, <https://www.bloomberg.com/news/features/2023-11-21/tech-war-us-china-competition-moves-into-advanced-chip-packaging>; Raj Varadajan 等人, 半导体供应链中新兴的复原力(波士顿咨询集团和半导体行业协会, 2024 年 5 月), <https://web-assets.bcg.com/25/6e/7a123efd40199020ed1b4114be84/>

半导体供应链中新兴的弹性-r.pdf。

90 Misha Lu, “AMD 合作伙伴、中国封装领导者通富微公布 2023 年第一季度业绩”, DIGI-TIMES Asia, 2023 年 4 月 27 日, <https://www.digitimes.com/news/a20230427VL203/amd-china-osat-tongfu.html>。

91 Akhil Thadani 和 Gregory C. Allen, “绘制半导体供应链: 印度-太平洋地区的关键作用”, CSIS, CSIS 简报, 2023 年 5 月 30 日, <https://www.csis.org/analysis/mapping-semiconductor-supply-chain-critical-role-indo-pacific-region>。

92 新兴技术观察站, “供应链探索者”。

93 Lee 和 Baptista, “芯片大战”。

94 Ben Jiang, “中国资助新 ‘Chiplet’ 技术研究项目以推进半导体目标”, 南华早报, 2023 年 8 月 3 日, <https://www.scmp.com/tech/policy/article/3229760/chinas-national-science-fund-supports-new-chiplet-tech-research-advance-semiconductor-self>。

95 Zeyi Yang, “这座中国城市想成为 Chiplets 的硅谷”, 麻省理工学院技术评论, 2024 年 2 月, <https://www.technologyreview.com/2024/02/07/1087825/chinese-city-silicon-valley-chiplets/>。

96 Julian Ho 和 Willis Ke, “中国 OSAT 加紧在先进封装领域的部署”, DIGITIMES Asia, 2021 年 7 月 8 日, <https://www.digitimes.com/news/a20210708PD202.html>。

97 Shilov, “华为转向 3D。”

98 Che Pan, “中国电信巨头华为推动半导体封装创新, 以缓解美国芯片制裁造成的中断”, 《南华早报》, 2022 年 4 月 7 日, <https://www.scmp.com/tech/big-tech/article/3173432/中国电信巨头华为推进半导体封装>。

99 Che Pan, “摩尔定律减缓纳米节点进展且美国制裁影响, 中芯国际敦促中国拥抱先进封装”, 《南华早报》, 2021 年 1 月 25 日, <https://www.scmp.com/tech/big-tech/article/3119174/中芯国际敦促中国芯片制造商采用先进封装摩尔定律>。

100 Matthew Schleich 和 William Alan Reinsch, “将国家安全担忧置于中国国产高端芯片”, CSIS, 关键问题, 2023 年 9 月 26 日, <https://www.csis.org/analysis/contextualizing-national-security-concerns-over-chinas-domestically-produced-high-end-chip>。

101 Anton Shilov, “中国准备突破 5nm 障碍 华为列出可能采用中芯国际技术制造的 5nm 处理器, 无视美国制裁”, Tom's Hardware, 2023 年 12 月 8 日, <https://www.tomshardware.com/tech-industry/semiconductors/china-poised-to-break-5nm-barrier-huawei-lists-5nm-processor-presumably-built-with-smic-tech-defying-us-sanctions>。

102 Chi Lim Tan, “比较: 长江存储、三星、SK 海力士和美光的最新 3D NAND 产品”, Tech Insights, 2023 年 1 月 11 日, <https://www.techinsights.com/blog/comparison-latest-3d-nand-products-ymtc-samsung-sk-hynix-and-micron>。

- 103 Belinda Dube 和 Simone Bertolazzi, “YMTC 232 层 3D NAND 存储器:一项意想不到的技术突破” ,Yole Group,2023 年 7 月 12 日, [https://www.yolegroup.com/technology-outlook/ymtc-232 层 3D NAND 存储器是 yole 系统编年史中一项意想不到的技术突破/](https://www.yolegroup.com/technology-outlook/ymtc-232-层-3D-NAND-存储器是-yole-系统编年史中一项意想不到的技术突破/)。
- 104 Jaiveer Singh Shekhawat 和 Akash Sriram, “苹果冻结使用中国长江存储芯片的计划 日经新闻”, 路透社,2022 年 10 月 17 日,<https://www.reuters.com/technology/apple-freezes-plan-use-chinas-ymtc-chips-nikkei-2022-10-17/>。
- 105 Junko Yoshida, “Chiplets:如果它在中国出现,它会留在中国吗?” ,Ojo-Yoshida 报告,2024 年 2 月 15 日, <https://ojoyoshidareport.com/chiplets-if-it-happens-in-china-will-it-stay-in-china/>。
- 106 TechInsights, “SunLune Jasminer X4 近内存以台积电矿机,配备晶圆到晶圆混合键合高级封装基本功能” ,2023 年 4 月,<https://www.techinsights.com/blog/sunlune-jasminer-x4-near-memory-ethereum-miner-wafer-wafer-hybrid-bonding-advanced-packaging>。
- 107 基于作者对半导体行业专家的采访,2024 年 3 月至 2024 年 4 月。
- 108 Joanna Gao 和 Judy Lin, “长江存储董事长称 IC 封装将比代工更重要”, DIGITIMES Asia,2024 年 7 月 24 日,[https://www.digitimes.com/news/a20240723PD215/chairman-semiconductor-industry-yangtze-memory-packaging-tv.html?dt\\_ref=tag](https://www.digitimes.com/news/a20240723PD215/chairman-semiconductor-industry-yangtze-memory-packaging-tv.html?dt_ref=tag)。
- 109 AJ Cortese, “这就是 SiC:中国旨在掌握您从未听说过的 EV 芯片” ,MacroPolo,2024 年 1 月 2 日, <https://macropolo.org/analysis/sic-china-ev-chip/>;以及 Poshun Chiu, “SiC 市场和供应链演变概览” ,Yole Group,2023 年 11 月 10 日,[https://medias.yolegroup.com/uploads/2023/12/202311-apcscrm\\_overview-of-sic-market-and-the-supply-chain\\_pch\\_external.pdf](https://medias.yolegroup.com/uploads/2023/12/202311-apcscrm_overview-of-sic-market-and-the-supply-chain_pch_external.pdf)。
- 110 Cortese, “那太碳化硅了。”
- 111 同上。
- 112 Junko Yoshida, “中国碳化硅: ‘脱钩时代的典型代表’ ” ,《Ojo-Yoshida 报告》,2022 年 12 月 7 日, <https://ojoyoshidareport.com/sic-in-china-poster-child-of-the-decoupling-era/>。
- 113 Cortese: “这太 SiC 了。”
- 114 Jackson Hu, “台湾向全球半导体领导地位的转变以及未来挑战”, DIGITIMES Asia,2024 年 2 月 29 日,<https://www.digitimes.com/news/a20240225PR200/taiwan-semiconductor-industry-subsidy-tsmc-umc-pure-play-foundry.html>。
- 115 菲茨杰拉德, “先进封装”。
- 116 Stewart Randall, “探索中国在先进封装领域不断演变角色” ,TechNode,2024 年 3 月 1 日, <https://technode.com/2024/03/01/exploring-chinas-evolving-role-in-advanced-packaging/>。
- 117 Rodney Chan, “中国 OSAT 为先进封装做好准备” ,《DIGITIMES Asia》,2024 年 6 月 21 日, <https://www.digitimes.com/news/a20240620PD220/china-osat-jcet-tfme-advanced-packaging-ic-manufacturing.html>。
- 118 Siu Han 和 Willis Ke, “在美国对华贸易制裁下,3D IC 封装将更快发展” ,na,美联社记忆主席称, ”DIGITIMES Asia,2022 年 11 月 2 日, <https://www.digitimes.com/news/a20221102PD205.html?fsm=cf2b2419561debce>;杨致远, “中国为何大力押注 Chiplet” 。
- 119 Pan, “中芯国际敦促中国拥抱先进封装” ;Amanda Liang 和 Judy Lin, “中国半导体行业协会执行官敦促中国芯片行业忘记先进节点,专注于切实的胜利” ,DIGI-TIMES Asia,2024 年 5 月 24 日,<https://www.digitimes.com/news/a20240524PD217/csia-china-semiconductors-chipset-3d-packaging-mature-process.html>;以及 King 和 Wu, “华为正在建立秘密芯片网络” 。



120 Ben Bajarín 和 Jay Goldberg,《摩尔定律和工艺与封装》,The Circuit YouTube 频道, 2023 年 1 月 16 日, <https://www.youtube.com/watch?v=gRJAd12SogE>。

121 Monica Chen,“美国下一次针对中国的出口禁令可能针对先进封装”,《DIGITIMES Asia》,2023 年 9 月 12 日,<https://www.digitimes.com/news/a20230911PD221/advanced-packaging-china-hua-wei-smic.html>。

122 John VerWey,“重新支持先进半导体封装”,安全与新兴技术中心,2022 年 6 月,<https://cset.georgetown.edu/publication/re-shoring-advanced-semiconduc-tor-packaging/>。

123 “国家先进封装制造计划”,美国国家标准与技术研究所,2024 年 2 月 1 日,<https://www.nist.gov/chips/research-development-programs/national-advanced-packaging-manufacturing-program>。

124 Shivakumar 和 Borges,“先进封装”。

125 Yang,“中国为何大力押注 Chiplet。”

---

封面照片

SAM YEH/AFP 通过盖蒂图片社



西北罗德岛大道 1616 号

华盛顿特区 20036 202 887

0200 | [www.csis.org](http://www.csis.org)