

Chiplet 生态系统的构建：EDA/IP、设备与材料的协同发展

张志伟, 李岳龙, 林福荣, 冯明宪*
国科创新研究院(厦门)有限公司, 福建 厦门 361000

摘要：本文聚焦 Chiplet 生态系统，深入探讨其在 EDA/IP、设备与材料方面的协同发展状况。阐述 Chiplet 技术优势及应用，分析相关 EDA/IP 的进展与挑战，梳理设备和材料领域的关键要素及市场格局，强调各环节协同对推动 Chiplet 技术发展、提升半导体产业竞争力的重要性，并对中国在该领域的发展提出展望与建议。

关键词：Chiplet 技术；EDA/IP；半导体设备；半导体材料；生态系统构建；协同发展；半导体产业

The Construction of the Chiplet Ecosystem: the Coordinated Development of EDA/IP, Devices and Materials

Zhang Zhiwei, Li Yuelong, Lin Furong, Feng Mingxian*

Guoke Innovation Research Institute (Xiamen) Co., LTD. Xiamen, Fujian 361000

Abstract：This paper focuses on the Chiplet ecosystem and deeply explores its collaborative development status in terms of EDA/IP, equipment and materials. It expounds the technical advantages and applications of Chiplet technology, analyzes the progress and challenges of relevant EDA/IP, sorts out the key elements and market patterns in the fields of equipment and materials, emphasizes the importance of the collaboration of all links in promoting the development of Chiplet technology and enhancing the competitiveness of the semiconductor industry, and puts forward prospects and suggestions for China's development in this field.

Keywords：Chiplet technology; EDA/IP; semiconductor equipment; semiconductor materials; ecosystem construction; collaborative development; semiconductor industry

引言

随着半导体工艺制程逐渐逼近物理极限，摩尔定律面临挑战，Chiplet 技术应运而生，成为半导体产业的重要发展方向。Chiplet 通过将多个可模块化的芯片裸片集成在一个封装内，有效解决了芯片研制中的成本、周期和性能等问题，而其生态系统的构建涉及 EDA/IP、设备与材料等多个关键领域的协同发展，对于推动半导体产业的持续进步意义重大^[1]。

一、Chiplet 技术概述

(一) Chiplet 技术原理与优势

Chiplet 技术是异构集成技术，它将大型芯片分解为多个具有独立功能的小芯片（Chiplet），再通过先进的互连技术将这些小芯片组合成一个完整的系统。与传统的单芯片集成方式相比，Chiplet 技术具有诸多优势^[2]。在成本方面，不同功能的芯片可采用最合适的制程工艺，避免了在单芯片上全部使用先进制程带来

的高昂成本，例如部分对性能要求较低的电路可采用成熟制程，降低整体制造成本。在设计灵活性上，每个 Chiplet 可独立开发和测试，然后按需组合，提高了设计的灵活性和可维护性，也缩短了产品上市周期。同时，Chiplet 技术还能提升芯片良率，将大芯片化整为零，减少了因芯片面积过大导致的缺陷问题。

(二) Chiplet 技术的应用领域

Chiplet 技术应用广泛，在高性能计算领域，如 AMD 的 Zen 2 架构，通过将不同工艺节点的处理器核裸片、IO 裸片和存储器

作者简介：

张志伟 (1979.05-)，男，汉族，中国台湾省新竹市人，博士，国科创新研究院(厦门)有限公司，主任工程师，研究方向：半导体产品封装测试及技术研发。

李岳龙 (1964.04-)，男，汉族，中国台湾省新北市人，博士，国科创新研究院(厦门)有限公司，教授，研究方向：科技管理与工程。

林福荣 (1954.08-)，男，汉族，中国台湾省高雄市人，硕士，国科创新研究院(厦门)有限公司，研究员，研究方向：半导体工厂运营管理。

通讯作者：冯明宪 (1960.03-)，男，汉族，中国台湾省台南县人，博士，国科创新研究院(厦门)有限公司，教授，研究方向：半导体/集成电路产品生产/测试封装，半导体封装测试设备。通讯邮箱：msfeng0327@126.com

裸片整合为 Chiplet 芯片，以较低成本获得高端工艺带来的计算处理性能提升。在 FPGA 领域，英特尔推出的基于 Chiplet 技术的 Agilix FPGA 家族产品，利用 3D 封装技术实现异构芯片集成，

提升了产品性能。此外，在物联网、5G 通信等领域，Chiplet 技术也展现出巨大的应用潜力，能够满足这些领域对芯片多样化功能和低功耗的需求^[3]。

表 1：先进半导体封装技术优劣势比较

封装技术类型	优势	劣势
FOWLP (扇外型晶圆级封装)	1. 成本较低，适合大规模生产，在量产时能有效控制成本。 2. 能有效减小芯片尺寸，提高集成度，缩小电子产品体积，提升产品的紧凑性。	1. 对封装设备和工艺要求较高，需要先进的设备和精准的工艺控制才能保证产品质量。 2. 散热性能相对受限，在处理高功率芯片时，散热可能成为瓶颈。
2.5D/3D 集成电路封装	1. 实现更高的集成度和性能提升，通过垂直堆叠芯片，增加了单位体积内的芯片数量，提升了系统功能。 2. 缩短信号传输距离，降低功耗，提高了信号传输效率，减少了能量损耗。	1. 制造成本高，制造过程需要高精度设备和复杂工艺，如硅穿孔(TSV)技术等，增加了生产成本。 2. 制造过程复杂，多层芯片堆叠带来了诸如层间对准、互连等技术难题。 3. 热管理难度大，芯片密集堆叠导致热量集中，散热困难，对散热设计要求极高。
System Packaging (SiP 系统封装)	1. 可将多个不同功能的芯片集成在一个封装内，实现系统级功能，减少了电路板空间占用，简化了系统设计。 2. 设计灵活性较高，能根据不同的应用需求，灵活选择和组合不同的芯片。	1. 占用空间相对较大，与一些先进的小尺寸封装技术相比，整体体积可能较大。 2. 不同芯片间的信号干扰问题需要解决，多种芯片集成在一起，信号之间可能会相互干扰，影响系统性能。
WLCSLP 晶圆级芯片尺寸封装	1. 芯片尺寸与封装尺寸接近，减小整体体积，在对尺寸要求严格的应用场景中具有优势，如可穿戴设备。 2. 电气性能好，信号传输延迟低，因为芯片与封装之间的连接路径短，信号传输速度快。	1. 对芯片的测试和修复较为困难，由于封装尺寸小，测试和修复过程需要高精度的设备和技术。 2. 不适合高引脚数的芯片封装，在处理高引脚数芯片时，布线和连接的难度较大。
Chiplet 芯粒技术	1. 设计灵活，可独立开发和测试各模块，每个 Chiplet 可以根据自身功能选择最合适的制程工艺，提高了设计的灵活性和产品的可维护性。 2. 降低成本，通过将大芯片分解为小芯片，部分小芯片可采用成熟制程，降低了制造成本，同时提高了良率，减少了因大芯片缺陷导致的整体报废。 3. 可实现不同制程工艺芯片的混合集成，能够充分发挥不同制程工艺的优势，满足多样化的功能需求。	1. 系统集成难度大，对互连技术要求高，需要高速、高密度的互连技术来确保不同 Chiplet 之间的高效通信，增加了技术实现的难度。 2. 测试和设计复杂度增加，每个 Chiplet 都需要独立测试，并且要考虑 Chiplet 之间的互连测试，设计过程也需要考虑多个 Chiplet 的协同工作，增加了设计和测试的复杂性。

二、EDA/IP 在 Chiplet 生态系统中的关键作用

(一) EDA 工具对 Chiplet 设计的支撑

EDA 工具在 Chiplet 设计过程中不可或缺。由于 Chiplet 涉及多个异构芯片的集成，设计复杂度大幅增加，需要更强大的 EDA 工具来进行芯片互连接口的标准化设计、多芯片布局和验证等工作。例如，在布局布线阶段，EDA 工具需要考虑不同 Chiplet 之间的信号传输延迟、功耗以及电磁兼容等问题，确保整个系统的性能。同时，为了实现可扩展性，EDA 工具需支持对多个 Chiplet 进行协同设计和验证，帮助设计人员快速发现并解决设计中的问题。

(二) Chiplet 的 IP 新理念与应用

Chiplet 的 IP 新理念强调以硅片形式提供部分半导体 IP 核，实现 IP 的“即插即用”和“重复利用”。这一理念解决了先进制程芯片面临的性能与成本矛盾，降低了大规模芯片设计的时间和风险。通过采用基于适合工艺制程的第三方 Chiplet 形式的 IP，芯片设计厂商能够简化设计流程，提高设计效率和灵活性。例如，在一些复杂的 SoC 设计中，可直接选用成熟的 Chiplet IP，减少了从头开始设计每个模块的工作量，加快了产品上市速度。

三、Chiplet 生态系统中的关键设备

(一) 半导体封测设备分类与重要性

半导体封测设备是 Chiplet 生态系统的重要组成部分，分为封装设备和测试设备。封装设备包括减薄机、划片机、固晶机、引线键合机、塑封机等，负责将芯片进行物理封装，确保其电气性能和散热性能。测试设备则用于对芯片产品进行功能和性能测试，如测试机、探针台和分选机等，筛选出性能不达标产品，保证产品质量。

(二) 关键设备的技术发展与市场格局

以固晶机为例，先进封装技术对固晶机的精度、速度和稳定性要求越来越高。目前，全球固晶机市场主要由 ASMPT、BESI 等公司垄断，这些公司的产品精度高、性能稳定，能够满足先进封装的需求。国内固晶机厂商如中电科 45 所、深圳翠涛等也在不断发展，努力提高产品性能和市场份额，但与国际巨头相比仍有差距。在测试设备领域，全球市场主要由泰瑞达、爱德万等公司主导，国内企业长川科技、华峰测控等也在积极追赶，部分产品已实现国产化替代，但在高端设备方面仍依赖进口。

四、Chiplet 生态系统中的基础材料

（一）晶圆厂涉及 Chiplet 的制程材料

1. 抛光材料

化学机械抛光（CMP）材料是集成电路制造过程中实现晶圆表面平坦化的关键材料，包括抛光液和抛光垫等。随着制程节点的不断进步，CMP 技术的重要性日益凸显，对抛光材料的要求也越来越高。例如，7nm 制程需要进行更多次的 CMP 工艺步骤，对抛光液的性能提出了更高要求。全球抛光材料市场中，美国的 Cabot Microelectronics、日本的 Fujimi 等公司占据重要地位，国内厂商如安集科技也在不断发展，部分产品已达到国际先进水平，但整体市场份额仍相对较低^[4]。

2. 光刻胶

光刻胶是半导体制造中的关键材料，其性能直接影响芯片的分辨率和制程精度。根据曝光波长和应用领域的不同，光刻胶可分为多种类型，如 G 线光刻胶、I 线光刻胶、KrF 光刻胶和 ArF 光刻胶等。目前，高端半导体光刻胶市场基本被日本企业垄断，如 JSR、TOK 等公司。随着半导体行业制程的进一步发展，ArF 光刻胶市场需求加速扩大，国内企业在光刻胶研发和生产方面面临较大挑战，但也在积极投入研发，努力实现国产化突破^{[5][6]}。

3. 其他材料

掩膜版、湿电子化学品、电子特种气体和溅射靶材等也是晶圆厂制程中的重要材料。掩膜版用于光刻工艺，其市场集中度

高，被国外公司主导。湿电子化学品用于清洗和蚀刻步骤，国内在该领域与国外存在一定差距，尤其在高端产品方面。电子特种气体在半导体制造过程中参与多种关键工艺，全球市场主要由美国空气化工、德国林德等公司垄断，国内厂商如南大光电、金宏气体等在部分产品上实现了技术突破和国产化替代。溅射靶材用于制备薄膜材料，全球市场由日美公司掌控，国内企业如江丰电子、有研新材等在不断提升技术水平，逐步打破国外垄断^[7]。

（二）封装厂涉及 Chiplet 的封装材料

1. 封装基板

IC 封装基板是芯片封装的重要组成部分，起到电气连接和支撑芯片的作用。根据封装形式、材料性质和连接技术的不同，可分为多种类型。随着半导体技术的发展，封装基板正朝着更高密度、更小尺寸和更高可靠性的方向发展。全球 IC 封装基板市场高度集中，日、韩、中国台湾地区的企业占据主导地位，如欣兴电子、三星电机等。中国大陆的 IC 载板产业起步较晚，但发展迅速，深南电路、兴森科技等公司已具备一定的量产能力。

2. 引线框架和陶瓷封装体

引线框架是半导体封装的主要结构材料，用于连接芯片内部与外部导线。国内引线框架生产企业起步较晚，中高端市场被外资企业占据，但国产替代正在加速推进。陶瓷封装体具有优良的性能，如高热导率、低介电常数等，常用的陶瓷基板材料有氧化铝、氮化铝等。不同的陶瓷基板材料适用于不同的应用场景，在电子封装领域发挥着重要作用。

表 2：全球及中国半导体相关材料市场规模

材料类型	全球市场规模（亿美元）	全球市场占比	中国市场规模（亿元）	数据来源	统计时间
半导体材料总体	-	-	1144.99（预计 2024 年）	职友集大数据	2024 年预测
晶圆制造材料	447（2022 年）	62.8%（2021 年）	-	SEMI	2022 年数据，2021 年占比
封装材料	280（2022 年）	37.2%（2021 年）	-	SEMI	2022 年数据，2021 年占比
硅片	123（2023 年）	约 22.9%（2021 年晶圆制造材料中）	165（2023 年）	中信证券	2023 年数据，2021 年占比
电子特气	51（2023 年）	约 13%（2021 年晶圆制造材料中）	249（2023 年）	中信证券	2023 年数据，2021 年占比
光掩模（掩膜版）	-	约 13%（2021 年晶圆制造材料中）	-	中信证券	2021 年占比
CMP（抛光材料）	-	7%（2021 年晶圆制造材料中）	-	中信证券	2021 年占比
光刻胶	25（2023 年）	约 5%（2021 年晶圆制造材料中）	39.3（2022 年）	中信证券	2023 年数据，2022 年中国数据，2021 年占比
溅射靶材	-	3%（2021 年晶圆制造材料中）	-	中信证券	2021 年占比

五、Chiplet 生态系统中各环节的协同发展

（一）协同发展的必要性

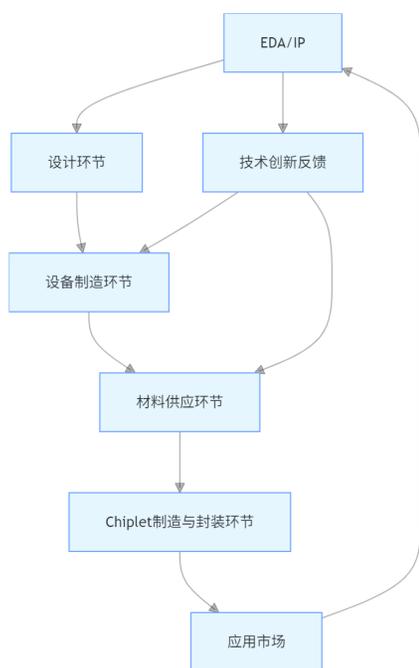
Chiplet 生态系统中 EDA/IP、设备与材料各环节紧密相关，如图 1 所示。EDA/IP 为 Chiplet 设计提供技术支持，决定了芯片的功能和性能；设备是实现 Chiplet 制造和封装的硬件基础，其技术水平直接影响生产效率和产品质量；材料则是 Chiplet 的物质基础，材料的性能和品质对芯片的性能和可靠性起着关键作用。只有各环节协同发展，才能实现 Chiplet 技术的整体进步，提高半导

体产业的竞争力。例如，先进的 EDA 设计需要高精度的设备来实现，而设备的运行又依赖于高质量的材料，材料的性能提升也需要 EDA 和设备的配合进行研发和生产^[8]。

（二）协同发展的现状与挑战

目前，Chiplet 生态系统各环节的协同发展已取得一定进展。一些企业在开发 Chiplet 产品时，会与 EDA 工具厂商、设备制造商和材料供应商紧密合作，共同解决技术难题。然而，协同发展仍面临诸多挑战。在技术标准方面，缺乏统一的标准体系，影响不同环节之间的兼容性和互操作性。在研发投入方面，各环节的

研发投入不平衡，部分关键技术和材料的研发进展缓慢，制约了整体产业的发展。此外，人才短缺也是一个重要问题，跨领域的专业人才不足，影响了各环节之间的有效沟通和协作。



> 图 1 Chiplet 生态系统各环节协同关系示意图

六、中国在 Chiplet 生态系统构建中的机遇与挑战

(一) 机遇

随着全球半导体产业的转移和中国对半导体产业的高度重视，中国在 Chiplet 生态系统构建中面临着诸多机遇。国内庞大的市场需求为 Chiplet 技术的发展提供了广阔的空间，在 5G、人工智能、物联网等领域的快速发展，对 Chiplet 芯片的需求不断增加。同时，国家出台了一系列支持政策，鼓励半导体产业的研发和创新，为 Chiplet 生态系统的构建提供了政策保障。此外，国内在一些领域已经取得了一定的技术突破，如部分电子特气、封装基板等材料的国产化替代，为进一步发展奠定了基础。

(二) 挑战

中国在 Chiplet 生态系统构建中也面临着严峻的挑战。在技术方面，与国际先进水平相比仍存在较大差距，尤其在高端 EDA 工具、关键设备和材料等方面，依赖进口的局面尚未根本改变。在产业生态方面，产业链各环节之间的协同合作还不够紧密，缺乏有效的沟通和协调机制。在人才培养方面，专业人才的短缺制约了产业的发展，需要加强相关领域的人才培养和引进。

七、结论与展望

Chiplet 技术作为半导体产业的重要发展方向，其生态系统的构建需要 EDA/IP、设备与材料的协同发展。通过各环节的紧密合作，不断解决技术难题，完善产业生态，Chiplet 技术将在未来半导体市场中占据重要地位。中国在 Chiplet 生态系统构建中既有机遇也面临挑战，应加大研发投入，加强人才培养，推动产业链各环节的协同创新，提高自主创新能力，逐步缩小与国际先进水平的差距，实现半导体产业的高质量发展。

参考文献

- [1] 李应选. Chiplet 的现状和需要解决的问题 [J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(05): 1-9.
- [2] Mounce G, Lyke J, Horgan S, et al. Chip-based approach for heterogeneous processing and packaging architectures. In: 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA: IEEE; 2016. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500830.
- [3] 赵正平. Chiplet 基三维集成技术与集成微系统的新进展 (续) [J]. 微纳电子技术, 2023, 60(05): 641-657. DOI: 10.13250/j.cnki.wndz.2023.05.001.
- [4] 刘俊杰. TSV 多种材料 CMP 速率选择性的研究 [J]. 河北工业大学, 2017(02).
- [5] 杜召亮. 基于电流体喷印的封装胶成型实验研究 [D]. 大连理工大学, 2022. DOI: 10.26991/d.cnki.gdlu.2022.003061.
- [6] 王志, 秦苏琼, 谭伟. 用于微电子封装的电子胶粘剂及其涂覆工艺 [J]. 电子工业专用设备, 2019, 48(01): 11-16.
- [7] 何金江, 吕保国, 贾倩, 丁照崇, 刘书芹, 罗俊锋, 王兴权. 集成电路用高纯金属溅射靶材发展研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(01): 79-87.
- [8] 李煜. 面向先进 FPGAs EDA 工具链的集成开发环境研究 [J]. 西安电子科技大学, 2022.