

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 105 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2021 年 2 月 8 日

“集成电路与光电芯片发展战略研究”论坛综述

一、背景

当前，新一轮科技革命和产业变革正在重构全球创新版图，世界各国围绕科技创新抢占未来发展制高点的竞争日趋激烈。国外技术封锁不断升级，而半导体技术首当其冲。习近平总书记在中国科学院第十九次院士大会、中国工程院第十四次院士大会上指出“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的”。过去 60 余年，CMOS 工艺一直遵循摩尔定律指引的步伐不断演进。目前，最先进的 CMOS 晶体管特征尺寸已经下降到 5 nm，业界仍然持续推进向 3 nm、2 nm 演进。然而，当前集成电路发展已悄然进入“后摩尔时代”。在人工智能、5G、物联网等应用需求爆发的背景下，先进的集成电路和光电芯片是继续推进高性能计算芯片的保障。近年来，国际国内涌现出诸多创新的工艺、器件及芯片技术，如 3D 垂直集成技术、异质集成、异质异构集成、三维堆叠集成、宽禁带与超宽禁带半导体材料器件和芯片、光子芯片、硅光芯片、混合光电子芯片、碳基芯片、柔性光电子/微电子芯片、微波光子芯片、量子计算芯片、类脑芯片等。

为了把握新一轮科技革命和产业变革的突破口，明确我国在集成电路与光电芯片领域创新能力短板，关注基础研究中可能产生重大突破的领域，前瞻布局基础研究资助方向，中国科学院学部组织召开了本次“集成电路与光电芯片发展战略研究（2021~2035）”科学与技术前沿论坛。

二、论坛概况

2020年9月15日，第105次中国科学院学部科学与技术前沿论坛“集成电路与光电芯片发展战略研究（2021~2035）”在北京会议中心举办。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院信息技术科学部和学部学术与出版工作委员会承办，西安电子科技大学和《中国科学》杂志社协办。郝跃院士和龚旗煌院士共同担任论坛主席，李树深、王立军等院士以及来自中国科学院、清华大学、北京大学、复旦大学、南京大学、西安电子科技大学等高校和科研单位的200余名专家和活跃在科研一线的优秀青年学者受邀参加。围绕“集成电路与光电芯片”这一主题，17位专家学者作了学术报告，从不同的角度对主题进行了深入的阐述，引起了与会专家学者们浓厚的兴趣。

三、报告及讨论

报告1~3：产业报告

海思半导体有限公司丘刚作了题为“集成电路产业发展的有形之手”的报告，重点指出了集成电路创新平台的重要性。

海思半导体有限公司曾栋针对“光电及化合物半导体发展机会与挑战”，介绍了光电产业的发展历程及历史机遇，并指出了光电芯片和化合物半导体发展面临的关键瓶颈和挑战。

长江存储科技有限公司夏志良带来了“3D NAND 闪存芯片技术创新与产业突破的探索”的报告，报告首先从工业生产的角度分别对传统3D NAND 闪存和新型存储器进行了深入的讨论，侧重于介绍目

前所面临的关键科学问题以及关键技术问题，并对未来发展方向进行了探讨，对存储器未来应用前景进行了预测，最后从工业发展的角度对中国微电子的发展进行了展望。

讨论：500G 的调制器是在高校还是企业制作，外延材料怎么解决？高校在基础研究方面有优势，企业主要解决驱动、封装以及其他工程问题，需要高校和企业联合攻关。外延材料目前国内有一定供应，然而高稳定性和高质量的材料还需依赖进口。海思期望与国内合作伙伴共同推进最底层工艺进步。

讨论：Intel 当年为什么放弃 3D NAND 闪存芯片技术？主要因为当时产业的问题，设备芯片工艺良率低，时机尚未成熟。

报告 4：复旦大学张卫教授“先进 CMOS 器件与工艺发展趋势”

5 nm FinFET 技术之后，由于 Fin 的高宽比的限制，CMOS 器件结构会发生根本性的变革。堆叠环栅器件和 FinFET 器件有很大的工艺兼容性，但对堆叠沟道的外延和选择性刻蚀、寄生电容的控制、沟道应力的设计，以及工艺技术及其配套装备的开发提出了很大的挑战。通过引入新型沟道材料，可进一步提高器件的性能。未来的新型电子系统将极大地促进新型绿色器件技术的开发，如隧穿晶体管、负栅电容晶体管、量子自旋晶体管等。为进一步提高 CMOS 系统的集成密度和性能，光刻技术、金属互连技术方面需要引入更多创新。DTCO 技术，是未来先进 CMOS 工艺进行路线探索不可或缺的技术。单片三维 IC 集成技术必将把 CMOS 系统的集成密度和性能推向一个全新的高度。

报告 5：北京航空航天大学赵巍胜教授“新型非易失存储器研究及展望”

传统的存储技术严重制约计算机性能及能效的进一步提升。以阻变存储器 RRAM、自旋存储器 MRAM 及相变存储器 PCM 为代表的新型非易失存储器受到学术界及产业界的广泛关注，近三年由台积电及

Intel 公司等逐步实现量产。其中 RRAM 在人工智能、类脑计算及 IoT 等领域具有广泛的应用前景；MRAM 已在航空航天计算系统获得了广泛使用，在消费级市场逐步应用；PCM 目前主要应用于数据中心。另外，铁电存储器 FeRAM、二维材料 Flash RAM 及其他前沿存储器技术也受到学术界的关注。针对这些技术的关键科学问题，技术难题提前布局及攻关，有望在当前存储器技术变革的发展中取得先机。

讨论：建议仿照比利时 IMEC 模式，建立 12 英寸存储器公共研发平台，形成材料、器件到芯片的协同发展。产学研紧密结合，以企业需求为主导，引导解决科学问题及技术难题。设立一些软课题，研究存储器产业及技术未来发展趋势。

报告 6：西安电子科技大学朱樟明教授“集成电路设计新进展与发展趋势”

集成电路设计是集成电路产业的重要环节。报告介绍了高能效模数转换器芯片、超高速模数转换器芯片、系统芯片、微处理器、集成化光电传感器、人工智能芯片、毫米波与太赫兹集成电路、光子芯片与量子计算等高性能计算芯片等方向的研究进展。超高速 ADC 的关键技术发展方向为高采样速度、高信号带宽以及高有效精度。毫米波、太赫兹集成电路的发展趋势为 MIMO 技术、数字化、三维成像及雷达通信融合芯片。高能效、高集成、智能化是集成电路设计的后续发展趋势。芯片高集成技术主要包括 Chiplet 技术、异质集成技术、3D 堆叠技术、异质异构集成等。集成电路设计正向人工智能驱动的新一代设计方法学演变，驱动集成电路设计的智能化。

讨论：基于国内集成电路工艺，通过技术创新获得高端芯片是发展集成电路自主可控的有效方式。

报告 7：复旦大学曾璇教授“新一代基于人工智能的集成电路设计自动化（EDA）”

电子设计自动化（EDA）是支撑集成电路产业的基础与工具，现

有 EDA 已无法满足现代集成电路设计和制造的要求，通过人工智能和机器学习方法实现集成电路的敏捷设计是集成电路设计方法学的未来发展趋势。在未来 5~15 年，应以集成电路新一代“无人参与闭环”智能设计为目标，交叉布局基础数学理论、EDA 算法、人工智能方法的完整应用基础。针对集成电路设计自动化中的仿真、优化、验证三大领域的若干前沿科学问题，研究集成电路智能化设计数学基础理论与方法，发展集成电路智能化设计流程和工具，实现新一代自主可控的 EDA 创新理论、方法、技术和产品，为我国集成电路产业安全和信息安全提供根本保障。

讨论：要与力学、热学、电磁学和数学交叉融合发展，综合全国优势力量。

报告 8：中电 55 所朱健研究员“跨维度异质集成技术”

报告从材料维度、器件维度、功能维度分析了异质集成技术，不同材料的独特优势，指出异质异构集成芯片的主要性能达到业界最高水平。不同功能器件通常在不同的衬底上通过不同的加工技术制造，需要跨维度异质集成技术，从平面集成向三维集成发展，推动化合物半导体器件、MEMS 器件、传感器等组合而成的复杂功能的电子信息集成系统的实现，充分发挥不同材料的半导体器件的性能优势。报告列出最新的国外异质集成技术进展，分析了跨材料维度集成技术、跨器件维度集成技术、跨功能维度集成技术、跨尺度维度融合等科学问题和关键技术问题，给出了国内在射频微系统和基于“万能离子刀”的异质集成技术的最新进展。

讨论：建议集合国内微电子、光电子、MEMS 技术等不同学科领域的优势研究单位、平台单位等，从基础理论、工艺方法、热管理等共性基础和测试方法等方面建立跨维度异质集成科研生产联盟。通过创新技术力争使用 28 nm 的工艺实现 7 nm 的性能。异质集成时要重点关注晶格失配、温度失配等问题。

报告 9：武汉大学刘胜教授“先进封装技术与先进测量技术”

国际半导体技术路线图（ITRS）已于 2016 年停用，2018 年开始出现异质集成路线图（HIR），异质集成新设计理念和设计生态。系统封装技术（SiP）已成为微电子和光电子发展的新引擎。报告综述了先进封装近 20 年的发展，包括倒装（FC）、多芯片组件封装（MCM）、芯片级封装（CSP），基于硅通孔（TSV）的三维封装技术（2.5D/3D），晶圆级扇出封装（FOWLP），先进板级封装（FOPLP）等。介绍了电子封装中的共性失效问题及重大挑战与难题。阐述了几个共性技术，包括与人工智能相结合的基于全寿命周期的芯片封装结构及工艺多场多尺度协同设计技术（数字孪生技术）、基于跨尺度物理设计的 EDA 工具。最后简述并展望了在线测量技术现状与前景。

讨论：涉及了很多力学问题，建议结合有限元软件，考虑物理非线性、几何非线性等问题，加强跨学科合作。

报告 10：清华大学吴华强教授“人工智能理论、器件与芯片”

人工智能已在电子、金融、医疗等行业广泛应用。算力和算法是人工智能的重要基石。目前，人工智能应用算力需求的快速增长与算力提升的放缓形成了尖锐矛盾。报告指出，发展人工智能理论是重要基础，需要基于生物和数理原理发展新型网络模型。此外，需要通过新架构、新计算范式、新传输机制来提升算力。报告介绍了存算一体、光电计算、脉冲神经网络等 AI 芯片的发展现状；阐述了 AI 器件，包括神经元器件、突触器件以及神经形态器件集成技术的新进展。报告指出，通过引入新原理的半导体器件，不但可以拓展芯片的功能，甚至可以颠覆传统电路理论，突破当前芯片面临的能效、速度瓶颈，大幅提升芯片性能。

讨论：建议更多地向数理、生物机理借鉴，实现高级认知，突破算力瓶颈。

报告 11：北京大学张志勇教授“碳基 CMOS 晶体管 and 集成电路”

现状与挑战”

半导体碳纳米管的主要优势是高迁移率和超薄体，具有优异的电学特性，是构建亚 10 nm 以下场效应晶体管的理想沟道材料。碳基信息技术应用领域涵盖传感器、特种芯片、射频芯片、数字芯片等。报告指出，我国已经发展了碳纳米管 CMOS 器件的无掺杂制备技术。碳纳米管 CMOS 器件可以缩减到 5 nm 栅长，并在性能和功耗综合指标上较目前最先进的硅基 CMOS 器件具有 10 倍以上的优势。同时，报告阐述了碳基集成电路发展的关键挑战及瓶颈问题。碳基集成电路的实用化发展受制于材料、加工工艺、电路设计等若干关键技术环节，下一步将针对晶圆级材料、大规模制备技术和器件结构优化等方面展开探索，提出完整的碳基集成电路实用化技术方案。

讨论：目前缺乏标准平台和技术标准，需要发展碳基的 EDA 技术和 PDK。

报告 12：西安电子科技大学马晓华教授“(超)宽禁带半导体材料、器件和芯片研究进展”

(超)宽禁带半导体材料适于制作抗辐射、高频、大功率和高密度集成的电子器件，其具有良好的抗辐射能力及化学稳定性、较高的饱和电子漂移速度及导热率、优异的电性能等特点。近年来，以 GaN、GaO、金刚石为代表的(超)宽禁带半导体材料是固态光源和电力电子、微波射频器件的“核芯”，在半导体照明、新一代移动通信、智能电网、高速轨道交通、新能源汽车、消费类电子等领域具有广阔的应用前景。报告结合国际上在该领域的创新思路，着重讨论了我国 GaN 微波功率器件、GaN 毫米波器件的发展路线与研究现状、优势、面临的挑战，介绍了 Si 基 GaN 技术、异质集成技术。此外，阐述了超宽禁带半导体电子器件与技术的研究现状与未来的发展思路。

讨论：GaN 为代表的宽禁带技术与国际无明显代差，第三代半导体应用在毫米波/亚毫米波还有技术短板，应提前布局。要注重和传感、

光电方面融合起来，要集思广益。

报告 13：中国科学院物理研究所张建军研究员、中国科学技术大学郭国平教授“量子芯片材料和器件技术”

近来，量子计算受到国内外越来越广泛的关注，各大跨国公司如 Google、IBM、Intel、百度、阿里、腾讯、华为等公司都在积极布局量子计算，各种量子软件和量子计算应用研究成果不断涌现，量子计算芯片工程化趋势日渐明显。报告介绍了半导体量子计算软硬件的国内外进展，阐述了量子比特编码和操控的国内外进展，探讨了未来 15 年半导体量子计算规模化、集成化、产业化的发展趋势，以及半导体量子计算发展中面临的关键技术问题、“卡脖子”问题。报告还指出，发展量子芯片的关键软硬件支撑技术包括：半导体量子计算核心材料研发、量子计算芯片研发试验生产线、量子 EDA 技术、极低温实验平台、高端高速模拟射频集成电路芯片供应链、量子软件栈等。

讨论：鼓励更多的人加入到半导体量子计算研究领域，建立半导体量子计算研究中心，期待企业与研究机构、大学携手合作。

报告 14：西北工业大学陈永华教授“柔性光电子微电子芯片”

柔性电子是在多种学科高度交叉融合基础上产生的颠覆性科学技术，能够突破经典硅基电子学的本征局限，可为后摩尔时代器件设计集成、能源革命、医疗技术变革等提供创新引领。柔性电子技术是将有机、无机材料电子器件制作在柔性、可延展性塑料或薄金属基板上的新兴电子技术，具有广泛应用前景。对柔性光电子微电子芯片的基础理论探索、关键技术开发和器件集成应用等前沿领域的研究具有重要科学意义和战略价值，能够为推动柔性电子的微型化、无感化、泛在化奠定重要基础。报告介绍了柔性电子芯片的技术内涵、国内外研究现状与发展趋势，阐明了柔性电子芯片的关键制造难点、科学问题及技术难题，分别从材料、器件与工艺方面给出了具体的发展方向。

讨论：结合传统 Si 芯片制作柔性电路板和柔性电子芯片可以分别

作为两个发展方向，不同性能要求对应不同方向。另外，应关注形变的应力问题，柔性基底，耐高温、耐弯折材料与高分子科学融合发展。

报告 15：电子科技大学刘永教授、南京大学陈向飞教授“混合光电子集成”

信息技术发展需要包括微电子、光电子在内的半导体集成器件的强有力支撑。光电子集成器件作为光网络的基石，面临着极好的发展机遇和极大的挑战。发展自主可控的大规模集成光芯片是我们的长期任务。当前国外在面向高速光信号传输和处理的大规模光子集成技术上也不成熟，这正是我们的机遇。报告对比分析了目前常用的三种光子集成材料体系，重点针对 III-V 族、二氧化硅/氮化硅、薄膜铌酸锂、中红外光电子、硫系材料、二维材料以及光电混合集成与封装测试技术，介绍其国内外研究进展与发展趋势，分析面临的基础问题与关键挑战，并建议对策。报告指出要借鉴微电子的成功经验，建设标准化的通用工艺代工平台，打通芯片标准化设计、流片、封装、测试链条。

讨论：创新平台建设是国家战略和政产学研协作的核心载体，成功的创新平台应该满足四要素：中立性、前瞻性、非盈利性，以及广泛参与性。

报告 16：北京大学王兴军教授“硅基光电子集成芯片：光电融合的核心技术”

硅基光电子集成芯片技术，是利用硅或与硅兼容的材料，应用硅工艺，以光子和电子为信息载体的硅基大规模集成芯片。硅基光电子学充分发挥硅基微电子先进成熟的工艺技术、高密度集成、价格低廉以及光子的极高传输速率、高抗干扰性和低功耗等优势，实现更高速率的信息传输、交换和处理，是一项革命性的技术。开展硅基光电子研究为集成电路、新一代计算机、光通讯、数据中心等领域的创新发展提供理论基础和技术储备点。报告介绍了硅基光电子学的发展历程及最新发展现状，阐述了硅基光电子学在数据中心、5G 通信、光通信、

人工智能、激光雷达等方面的应用及重要研究方向，并指出了未来的发展趋势，梳理了关键科学与技术问题。

讨论：发挥微电子在信息处理和存储方面的优势，以及光电子在信息传输和互连方面的优势，实现光电协同设计。

报告 17：中国科学院半导体所李明研究员、西南交通大学闫连山教授“微波光子芯片及集成”

微波光子技术融合了微波射频技术泛在、灵活和高频谱分辨率的优点以及光子技术宽频带、高速率、低功耗的优点，应用领域主要包括卫星通信、超宽带无线通信、高性能雷达系统、高性能电子战系统等。目前，微波光子系统主要采用分立光电子器件，导致整个系统体积大、功耗高和可靠性差。要从根本上解决这些问题，必须利用光电子与微电子集成芯片技术，在芯片层面进行微波光子功能集成。报告围绕微波光子芯片及其集成，首先从军用和民用方面介绍了背景需求，指出了关键科学与技术问题、分别从半导体激光器芯片、光电探测器芯片、电光调制器芯片、微波光子功能集成芯片及系统等方面介绍了国内外研究现状与国际发展趋势，阐述了发展思路与对策。

讨论：构建类似美国 AIM Photonics 和欧洲 IMEC 的仿真设计、加工制备、晶圆测试、混合封装等全链条研发体系。参考美国 ERI 组织模式，只提问题和需求，揭榜挂帅。

四、论坛总结

本次论坛的成功举办为集成电路与光电芯片领域的院士专家们搭建了学术思想碰撞的交流平台，对我国集成电路突破技术封锁、迈向新的台阶起到了积极作用。集成电路与光电芯片相关的新器件研究方向均在寻求标准化的代工平台与封测系统，多个领域呼吁 EDA 技术支持，呼吁领域间合作，如光电子与微电子融合、集成电路与光芯片融合，以及量子与经典融合等。面对信息技术和产业复杂的发展形势，集成电路与光电芯片的融合发展将对信息技术和产业发展带来重要和

难得的机遇，为突围技术封锁提供强有力的支撑。

郝跃院士最后指出，要加强基础研究，坚定走自己的路，并坚信这条路一定会走成。他呼吁广大专家学者集思广益，努力实现关键核心技术自主可控，把创新主动权、发展主动权牢牢掌握在自己手中。

（作者：项水英，西安电子科技大学通信工程学院教授；彭悦，西安电子科技大学微电子学院助理研究员；谢敏，西安电子科技大学微电子学院华山岗位副教授；韩根全，西安电子科技大学微电子学院教授；郝跃，中国科学院院士，西安电子科技大学微电子学院教授）

联系方式：中国科学院学部工作局学术与文化处，010-59358366