

《半导体视界》官网：https://www.svi-mag.com

《半导体视界》联系邮箱：semi2025@126.com

主管单位：中国国际科技促进会

主办单位：中国国际科技促进会半导体产业发展分会

地址：北京市丰台区汽车博物馆西路 8 号院 3 号楼 2 层 203

半导体视界
Semiconductor Horizons
Price:RM30

Semiconductor Horizons

Volume 1, Issue 2, December 2025

中国国际科技促进会主管　中国国际科技促进会半导体产业发展分会主办　国际标准刊号：ISSN3093-8430

半导体视界
Semiconductor Horizons

Volume 1, Issue 2
December
2025



封面人物：陈伟

西交利物浦大学芯片学院院长
美国发明家科学院院士

Cover Feature: Chen Wei
Dean of the School of CHIPS, Xi'an Jiaotong-Liverpool University / Fellow of the National Academy of Inventors (USA)

半导体行业的机遇与展望

——《电子信息制造业2025-2026 年稳增长行动方案》政策解析

Opportunities and Outlook for the Semiconductor Industry
—Policy Analysis of the "Action Plan for Stable Growth in Electronics Information Manufacturing (2025–2026)"

智聚创新 赋能未来

——记第四届世界前沿科技大会

Gathering Intelligence, Empowering the Future
—A Report on the 4th World Frontier Science and Technology Conference

从全球芯片企业裁员潮透视产业重构逻辑

Seeing Industrial Restructuring Through the Global Chip Layoff Wave

eISSN 3093-8430
9 772093 843007

中国国际科技促进会半导体产业发展分会

聚力芯时代 智启新未来

Empowering the Chip Era, Igniting an Intelligent Future

《半导体视界》是由中国国际科技促进会主管、中国国际科技促进会半导体产业发展分会主办、中宇国际教育中心出版的国际性半导体产业综合期刊，中国科学院院士、半导体材料及材料物理学家王占国教授担纲总编，西交利物浦大学芯片学院院长、美国发明家科学院院士陈伟教授出任主编。

《半导体视界》深耕半导体领域核心，立足全球科技前沿，以微观视角探秘芯片技术肌理，以宏观格局洞察国际产业脉络，既是链接全球技术智慧的核心载体，也是解锁半导体未来密码的权威平台。

作为产业发展的“指南针”、企业增长的“导航仪”、行业决策的“硬核参考”，《半导体视界》愿携手全球行业精英，为科研探索点亮方向、为产业决策赋能增效，共拓半导体领域无限未来。

Semiconductor Horizons is an international, comprehensive journal dedicated to the semiconductor industry. It is supervised by the China International Association for Promotion of Science and Technology (CIAPST), hosted by the Development of Semiconductor Industrial Branch of CIAPST, and published by Zhongyu International Education Center. The journal is led by Professor Wang Zhanguo, an academician of the Chinese Academy of Sciences and a renowned expert in semiconductor materials and materials physics, as Chief Editor, with Professor Chen Wei, Dean of the School of CHIPS, Xi'an Jiaotong-Liverpool University and a Fellow of the National Academy of Inventors (USA), serving as Editor-in-Chief.

Semiconductor Horizons delves deeply into the core of the semiconductor field, positioning itself at the forefront of global technological advancement. With a microscopic lens, it unravels the intricate fabric of chip technologies; with a macroscopic perspective, it discerns the evolving dynamics of the global semiconductor industry. The journal serves both as a pivotal platform connecting global technical expertise and as an authoritative gateway to unlocking the future of semiconductors.

As a "compass" for industry development, a "navigation system" for corporate growth, and a "hard-core reference" for strategic decision-making, Semiconductor Horizons is committed to partnering with global industry leaders to illuminate the path of scientific research, empower and enhance industrial decision-making, and jointly pioneer the boundless future of the semiconductor field.

半导体视界

ISSN 3093-8430

你的『芯』朋友

半导体产业发展交流群

《半导体视界》国际期刊官方公众号

中国国际科技促进会半导体产业发展分会

聚力芯时代 智启新未来

在全球化竞争与科技自主创新双重驱动下，半导体产业已成为国家战略的核心支撑。中国国际科技促进会半导体产业发展分会（以下简称“分会”）应势而立，以“创新驱动、协同共进、开放合作”为核心理念，汇聚政、产、学、研、用多方资源，致力于推动中国半导体产业突破技术壁垒、构建完整生态、提升国际竞争力。

分会依托中国国际科技促进会的权威平台，覆盖半导体全产业链——从芯片设计、制造、封装、测试到材料、设备、应用，联合清华大学、北京大学、复旦大学、中科院半导体所等顶尖高校与科研机构，以及中芯国际、长江存储、华为海思、韦尔股份、北方华创等龙头企业，共同打造具有全球影响力的产业创新枢纽。

核心服务涵盖政策研究、技术攻关、市场拓展、标准制定、人才培养、国际合作等多个维度。分会深度参与国家产业政策建言，发布《中国半导体产业发展白皮书》《细分领域技术路线图》等年度系列报告，牵头设立“半导体关键核心技术攻关联盟专项”，创建品牌活动如“半导体先进技术创新与应用大会”“产业链供应链安全与创新大会”等，聚焦 EDA、光刻机、第三代 / 第四代半导体等“卡脖子”环节，加速技术成果转化与产业化应用。

会员体系分为高级团体会员、理事团体会员、常务理事团体会员三个层级，享受包括政策咨询、技术对接、市场拓展、媒体传播、标准参与、国际交流等差异化权益。分会通过“校企对接”“政府资源导入”“国际展会组织”等举措，为企业提供全周期成长赋能。

未来，分会将聚焦 Chiplet、量子芯片、第三代 / 第四代半导体等前沿领域，构建“半导体产业大脑”数字化平台，推动国际标准互认，助力中国实现“芯片强国”之梦。

欢迎加入我们，共赴“芯”征程，携手铸就中国半导体产业的新辉煌！

联系方式：

邮箱：semi2025@126.com　　官网：https://www.svi-mag.com/

半导体视界 | 卷首寄语

芯征程：机遇、挑战与未来

亲爱的读者们：

在全球科技迅猛发展的今天，芯片行业作为支撑现代信息技术和智能化应用的核心，正面临着前所未有的机遇与挑战。随着人工智能、物联网和 5G 等新兴技术的崛起，AI 芯片的需求日益增长，推动着整个行业的快速演进。然而，伴随这一发展潮流，我们也不得不直面一系列亟待解决的问题。

首先，市场的投资热潮虽然为芯片行业带来了丰厚的资金支持，但过热的投资环境也可能导致资源的错配和技术的泡沫化。许多初创企业在追逐短期利益的同时，忽视了基础技术的扎实研发，导致在核心竞争力上难以形成突破。更为严峻的是，随着市场的调整，一些大型科技公司开始进行裁员，反映出行业对未来增长的谨慎态度。这不仅影响了员工的士气，也对整个行业的创新能力构成了挑战。

其次，人才短缺依然是制约行业发展的重要因素。尽管各大高校和研究机构不断培养新的人才，但与行业快速发展的需求相比，仍显得捉襟见肘。我们需要更加注重跨学科的人才培养，以适应芯片技术日益复杂的生态环境。尤其是在 AI 和量子计算等前沿领域，专业人才的稀缺使得企业在技术研发和市场竞争中处于劣势。

此外，摩尔定律的极限逐渐显现，传统的制程技术面临瓶颈。量子隧穿效应等新现象的出现，迫使我们重新思考未来芯片设计和制造的方向。如何在保持性能提升的同时，降低功耗和成本，将是我们必须面对的重大挑战。与此同时，全球供应链的不稳定性也给芯片生产带来了额外的压力。

在这一背景下，我们期待通过本期刊物，深入探讨芯片行业的现状与未来发展动向，分享各界专家的见解与经验。希望能为读者提供有价值的参考，助力大家在这一充满变革的时代把握机遇，共同推动芯片技术的进步与创新，尤其是在芯片的应用层面，比如新能源汽车、大健康、低空通讯、环境与水处理、航空与航海等。

感谢您的关注与支持，期待与您一起探索芯片行业的未来！

祝好。

《半导体视界》主编
西交利物浦大学芯片学院院长 / 美国发明家科学院院士
陈伟教授



2025 年 11 月

Semiconductor Horizons | Editorial Note

Chip Journey: Opportunities, Challenges, and the Future

Dear Readers:

In today's era of rapid global technological advancement, the semiconductor industry—serving as the cornerstone of modern information technology and intelligent applications—is encountering unprecedented opportunities and challenges. With the rise of emerging technologies such as artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and 5G, demand for AI chips is surging, accelerating the industry's evolution at an extraordinary pace. Yet, alongside this wave of progress, we must also confront a series of pressing issues that urgently require solutions.

First, while the current investment boom has brought substantial financial support to the semiconductor industry, an overheated investment climate may also lead to misallocation of resources and the formation of technological bubbles. Many startups, in their pursuit of short-term gains, have overlooked the importance of solid foundational R&D, making it difficult for them to achieve breakthroughs in core competitiveness. More concerning still, as the market undergoes adjustments, several major tech companies have begun layoffs—a sign of growing caution about future growth prospects. This trend not only dampens employee morale but also poses a significant challenge to the industry's overall capacity for innovation.

Second, talent shortage remains a critical bottleneck constraining the industry's growth. Although universities and research institutions continue to cultivate new talent, the supply still falls short of the rapidly expanding demands of the sector. There is an urgent need to place greater emphasis on interdisciplinary education and training to meet the increasingly complex ecosystem of chip technology. This gap is especially pronounced in cutting-edge fields such as AI and quantum computing, where the scarcity of specialized professionals puts companies at a disadvantage in both technological development and market competition.

Moreover, the limits of Moore's Law are becoming increasingly evident, and traditional process technologies are hitting a bottleneck. Emerging phenomena such as quantum tunneling are compelling the industry to rethink the future direction of chip design and manufacturing. A major challenge ahead lies in how to continue improving performance while simultaneously reducing power consumption and cost. At the same time, global supply chain instability is adding further pressure to chip production, creating additional uncertainties for the industry.

Against this backdrop, we hope this issue will offer in-depth insights into the current state and future trajectory of the semiconductor industry, featuring perspectives and experiences from experts across various fields. Our goal is to provide readers with valuable reference points to help navigate this era of profound transformation—seizing opportunities and collectively advancing innovation in chip technology, particularly in its real-world applications such as new energy vehicles, health and wellness, low-altitude communications, environmental and water treatment systems, and aerospace and maritime technologies.

Thank you for your attention and support. We look forward to exploring the future of the chip industry together with you!

Best wishes.

Editor-in-Chief, Semiconductor Horizons
Dean of the School of CHIPS, Xi'an Jiaotong-Liverpool University /
Fellow of the National Academy of Inventors (USA)
Professor Chen Wei

November, 2025

半导体视界　Semiconductor Horizons

主　管： 中国国际科技促进会

Supervisor: China International Association for Promotion of Science and Technology

主　办： 中国国际科技促进会半导体产业发展分会

Organizer : China International Association for Promotion of Science and Technology Development Of Semiconductor Industrial Branch

出　版： 中宇国际教育中心

Publication : Zhongyu International Education Center

承　办： 赛米垦拓 (北京) 科技有限公司

Undertake : Semicontour (Beijing) Technology Co., Ltd.

国际标准刊号： ISSN:3093-8430

总　编　Chief Editor

王占国
Wang Zhanguo

执行总编辑 / 社长　Executive Editor/President

王　超
Wang Chao

主　编　Editor-in-Chief

陈　伟
Chen Wei

副主编　Deputy Editor-in-Chief

邹　军　潘　菲
Zou Jun, Pan Fei

编务总监　Editorial Director

王世明
Wang Shiming

值班编辑　Duty Editor

于雪晶
Yu Xuejing

英文编辑　English Editor

任　蓓
Ren Bei

美术编辑　Art Editor

曹智奇
Cao Zhiqi

编委会　Editorial Board

史启航　胡　杨　慕容素娟　周　亮　杨道国　靳永刚　林挺宇　王跃忠　魏淑华　姜岩峰　王怡昕　陈苑锋
徐建明　霍金鹏　赵新民　闫建昌　陆骐峰　孙媛丽　叶　剑　Amer Kotb（埃及）　JANGYONG KIM（韩）
陶志伟　韦仕艳　赵冬梅　田　也

Shi Qihang, Hu Yang, Murong Sujuan, Zhou Liang, Yang Daoguo, Jin Yonggang, Lin Tingyu, Wang Yuezhong, Wei Shuhua, Jiang Yanfeng, Wang Yixin, Chen Yuanfeng, Xu Jianming, Huo Jinpeng, Zhao Xinmin, Yan Jianchang, Lu Qifeng, Sun Yuanli, Ye Jian, Amer Kotb(Egypt), JANGYONG KIM(South Korea), Tao Zhiwei, Wei Shiyan, Zhao Dongmei, Tian Ye

市场部　Marketing Department

刘妍东　董验宽　石　艳
Liu Yandong, Dong Yankuan, Shi Yan



目 录
CONTENTS

卷首寄语
Editorial Note

01 芯征程：机遇、挑战与未来

盟动全球
Alliance Global

06 智聚创新 赋能未来
—— 记第四届世界前沿科技大会

10 苏州论“芯”：
异质集成破局半导体产业新赛道

14 中国国际科技促进会半导体产业发展分会关于征集《介入式脑机接口临床与转化病房系统建设指南》等 12 项团体标准起草单位和起草人员的通知

商机快报
Business Opportunities Express

16 解码新周期下的投资新机
中国首片大尺寸封装级载板下线
中国商务部宣布加强稀土相关物项出口管制
前三季度中国出口机电产品总值同比增长 9.6%
深圳市半导体与集成电路基金一期揭牌
台积电第三季度净利润再创新高
首款中国国产通用 GPU 芯片发布
英伟达计划投资 OpenAI1000 亿美元用于新一代系统部署
《华尔街日报》曝英特尔将吸纳苹果与台积电入股推动公司转型
美针对中方稀土出口管制将对中方加征 100% 关税

技术纵横
Technology

32 技术深度：前沿技术成果点亮创新版图
苏州纳米所纳米加工平台在 β-Ga2 O3 功率器件领域取得突破
华为公布两项芯片技术 破解高热功耗瓶颈
多国联合团队开发出化学液体沉积新工艺
韩日合资公司 DK 联盟开发出中间形成层技术
谷歌首次实现可验证子优势 比最快超算快 1.3 万倍

36 应用前沿：技术落地激活产业新生态
复旦大学科研团队研发全球首颗二维 - 硅基混合架构闪存芯片
清华大学科研团队研制出全球首款亚埃米级快照光谱成像芯片
全球首颗超高耐压毫米波隔离驱动芯片发布
美国科学家研发出一款光基芯片 执行 AI 任务能效提升十至百倍

芯界语录
Quotes from the Chip World

21.71 黄仁勋 陈南翔 桑杰·梅赫罗特拉 彼得·温宁克 陈志宽 约翰·纽菲尔 刘德音 蒋 渊 楚 庆 魏少军

芯光人物
Core Light Figures

40 陈少民：驰骋职场的好“老爸” 和思想者

政策解码
Policy decoding

22 半导体行业的机遇与展望
——《电子信息制造业 2025-2026 年稳增长行动方案》政策解析

25 多维发力驱动产业自主可控
—— 2025 年 1-8 月中国半导体产业政策汇总集锦

学术引擎
Academic Engine

44 氮化物半导体深紫外 LED 技术现状及应用

51 基于低维碳化钒 MXene 的感存算一体化人工突触及其神经形态应用

58 芯片传感技术在大健康领域的应用

产业深探
Industry in-depth exploration

28 从全球芯片企业裁员潮透视产业重构逻辑

编读往来
Editorial and Reading Exchanges

72 会员服务与商务合作

智聚创新 赋能未来

—— 记第四届世界前沿科技大会

中外嘉宾围绕全球前沿科技发展、产学研用协同创新路径和科技成果产业化瓶颈突破等关键议题展开深入研讨，既聚焦人工智能大模型、元宇宙应用、免疫细胞疗法、机械制造等前沿技术方向，也关注“从科研到产业”的全链条转化难题，为全球科技资源整合与创新价值落地凝聚共识。

文 / 珂 闻



会议现场



第十三届全国政协副主席辜胜阻在会上致辞

9月14日，作为中国国际服务贸易交易会（CIFTIS）核心主题论坛之一，以“科技创造美好未来”为主题的第四届世界前沿科技大会（2025WFSTC）在北京首钢国际会展中心成功举办。大会由中国国际科技促进会、中国高技术产业发展促进会及首都会展集团联合主办，北京国际展览中心有限公司等单位承办，10余家国内外机构鼎力支持，汇聚全球科技力量共探科技创新路径。

Core Summary

On September 14, the 4th World Frontier Science and Technology Conference was held in Beijing as a core forum of the China International Fair for Trade in Services (CIFTIS). Co-organized by multiple institutions, the event brought together over 1,000 domestic and international participants. Focusing on cutting-edge fields such as artificial intelligence and immune cell therapy, the conference featured in-depth discussions on critical topics including technology commercialization and industry-academia-research collaboration. A highlight of the event was the launch of a metaverse cloud-network platform designed to transcend spatial and temporal limitations. Over ten cooperation agreements were signed on-site, 131 industrializable projects and group-standard application cases from home and abroad were unveiled, and the construction of China's preprint platform was officially launched. Additionally, the construction of China's preprint platform was officially initiated. Having now convened four times, the conference has evolved into a vital bridge for integrating global scientific resources and addressing challenges in technology transfer—driving international scientific collaboration from dialogue toward tangible outcomes.

千余位嘉宾共话科技未来

本届大会汇聚科技领域权威力量，第十三届全国政协副主席辜胜阻，中国国际科技促进会会长段洪毅，北京市人大常委会副主任于军，中国高技术产业发展促进会理事长赵震声，原农业部副部长、原国务院扶贫办主任刘坚，科技部原党组成员张景安，中国科学院院士陈润生，全国工商联人工智能委员会委员、中国商业文化研究会新技术专业委员会主任陈琼等科技领域的领导、专家学者和企业家代表，埃塞俄比亚联邦民主共和国驻华大使馆副馆长Ambassador Dawano Kedir，英国中华总商会副主席、欧盟中国委员会执行副秘书长Dr.Peter Jeng以及来自日本高级创业支援机构（J-SCORE）、泰国国家贸易经济协会等机构的国际嘉宾出席。开幕式由央视著名财经主持人杨晋主持，辜胜阻、段洪毅、赵震声、于军等领导为大会致辞。

中外嘉宾围绕全球前沿科技发展、产学研用协同创新路径和科技成果产业化瓶颈突破等关键议题展开深入研讨，既聚焦人工智能大模型、元宇宙应用、免疫细胞疗法、机械制造等前沿技术方向，也关注“从科研到产业”的全链条转化难题，为全球科技资源整合与创新价值落地凝聚共识。

破解科技成果转化“最后一公里”难题

多位嘉宾在致辞和演讲中直指科技创新的关键痛点，提出务实发展建议：

段洪毅会长在致辞中进一步明确，作为中国国际服务贸易交易会的重要组成部分，世界前沿科技大会肩负着深化开放合作、引领科技创新的重要使命。我们依托服贸会的强大影响力，聚焦前沿科技成果与应用，为全球科技力量搭建展示与交流的重要平台。



北京市人大常委会副主任于军在会上致辞



中国国际科技促进会会长段洪毅在会上致辞



中国科学院院士陈润生作主题报告



中国科学院大学知识产权学院副院长宋河发作主题报告



中国国际科技促进会会长段洪毅宣读成立联合国咨商办公室批复文件



中国国际科技促进会国际学术交流工作委员会主任房立雯介绍云网



中国国际科技促进会副秘书长张士谨主持国际合作项目推荐发布活动



科促会标准化工作委员会副主任王文秀主持标准发布仪式

于军结合北京科创中心优势提出：在前沿科技的发展过程中，法治的保障作用至关重要。北京市人大常委会一直高度重视科技创新领域的立法工作，先后制定和修订了一系列相关法规，为科技创新营造了良好的法治环境。

Ambassador Dawano Kedir 和 Dr. Peter Jeng 等嘉宾也对未来国际科技合作提出了畅想，期待以本次大会为起点，加强与中国在医疗、农业和数字技术等领域的技术共享。

议题聚焦多个前沿领域

本届大会内容丰富，包括开幕盛典、院士专家高端对话、前沿科技成果展览、国际项目合作洽谈会等活动。

在特邀报告环节，中国科学院院士陈润生以《我对人工智能的一些认识》为题，解析 AI 技术在医疗、材料等领域的突破性应用；中国科学院大学知识产权学院副院长宋河发教授从知识产权视角提出，高质量创新需以“技术突破 + 产权保护”双轮驱动。

“只有筑牢知识产权护城河，才能将科研成果转化为新质生产力。”这一观点引发与会者共鸣。

“云网”破局传统展会痛点

本届大会独具匠心打造世界前沿科技大会元宇宙平台——世界前沿科技大会云网（简称：云网），并进行了隆重发布。

云网融合了元宇宙展厅、AR 智能交互技术、智能会议系统、MR 混合现实技术和区块链技术。无论参与者身处全球何处，皆能打破时空界限，身临其境参与大会交流，打造“永不落幕的世界前沿科技大会”，为大会后续常态化科技交流奠定基础。

成果丰硕，多点突破

本届大会在前沿技术推广、科技项目落地、国际合作深化等方面成果丰硕。为深化国际科技交流，科促会成功获得联合国经社理事会的特殊咨询商地位，在本届大会开展了“咨商办公室”揭牌仪式，同时举行了多场国际合作签约和项目推介发布活动。

第三届世界前沿科技大会推出了以宇树人形机器人等十几个项目为主的科技产品，取得了很好的产业化效果。为此，本届大会经专家从多维度评价，推选出国内 iNKT 免疫细胞疗法等 46 项可产业化项目和优选出的 85 项国外合作项目集中亮相发布，十余项科技项目签约落地。相关成果覆盖人工智能、大数据、通信信息与网络安全、装备制造、绿色能源、农业、医学等领域，兼具技术先进性与推广价值。

据介绍，从本届世界前沿科技大会开始，主办方将不定期在“世界前沿科技大会元宇宙平台”、世界前沿科技大会网站和公众号、科促会官网和公众号发布推荐国内外可产业化的项目，为企业和科研单位做好服务。

会议期间，中国国际科技促进会团体标准典型应用案例发布，成为创新技术从“标准化规范”迈向“规模化推广”的关键一步，为创新技术落地产业、赋能实际场景应用筑牢了标准支撑。

预印本平台建设为学术期刊提供国际化智能化新通道

具有联合国经社理事会特殊咨商地位的中国国际科技促进会和国际信息发展组织联合周培源基金会、南洋科学院（新加坡）以及多家权威学术机构，经过深入研究与系统论证，在大会上正式启动了“中国预印本平台建设”战略项目。该平台将以国际一流标准建设，深度融合人工智能、知识图谱、深度理解、深度研究、多模态交互式论文等创新技术，打造一个兼具全球开放性、学术权威性、



技术先进性的科研交流新型基础设施，实现“加速科研成果传播，赋能科技创新效率提升；提升中国科研国际话语权，增强科技影响力；推动全球科研协同，助力解决全球性挑战；完善学术评价体系，构建健康学术生态”的目标。

大会还进行了《十项主推重要技术成果》推介发布和《大极数无相带永磁直流电机》和《大力推进低空经济高质量发展》新书发布等活动。

此外，来自数字技术、生物医疗、智慧健康等领域的十余位企业家，分享了企业自主创新成果，展现了前沿科技对数字经济深化、产业转型升级的推动作用，为相关领域发展提供了可借鉴的实践样本。

四届历程打造全球科技转化桥梁

以科技之光照亮全球未来的第四届世界前沿科技大会圆满落幕，标志着中国在推动全球科技协作与创新转化中迈出了坚实步伐。大会伴随服贸会走过四届，逐步形成“智聚全球科技资源、共筑全链条创新生态”的核心优势。通过搭建跨领域、跨国界的前沿科技产学研用交流对接桥梁，围绕全球科技资源整合策略、创新成果产业化落地举措等关键方向凝聚合作共识，更成功探索出“从科研攻关突破、学术成果沉淀，到科技成果市场化应用、产业化落地”的全链条创新路径，实现国际合作从“跨国界对话”到“项目化落地”的实效跨越，让科技交流的共识真正转化为产业发展的动能。

世界前沿科技大会组委会执行主席闫博华在接受媒体采访时指出，作为服贸会体系的“成果转化助推器”，大会将持续为全球科技创新破解“最后一公里”难题提供实践参考。



中国国际科技促进会副秘书长张勇生主持多项合作签约仪式



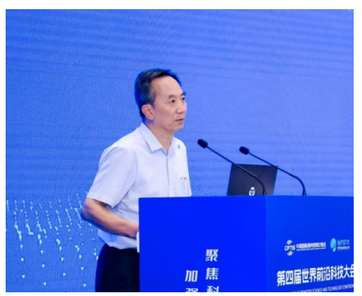
“中国预印本平台建设”战略项目启动仪式



合作签约



科促会标准化工作委员会副主任郝宇华主持团体标准典型应用案例发布仪式



中国国际科技促进会副秘书长张志军主持推介和新书发布活动

苏州论“芯”：异质集成破局半导体产业新赛道

当半导体行业逼近性能极限，异质集成与先进封装技术成为破局核心。论坛上，金刚石外延生长、GaN键合创新、低温混合键合等前沿成果集中亮相，专家们围绕“界面革命”破解功耗难题、全链条协同创新等产业痛点深入剖析，直击核心议题，解读技术突破方向，全面呈现了对国产化与产业化落地的真知灼见。

文 / 伟 达



会议现场

10 月 22 日至 23 日，由中国国际科技促进会半导体产业发展分会联合国家第三代半导体技术创新中心（苏州）、中国科学院上海微系统与信息技术研究所共同主办的“2025 半导体异质集成与先进封装技术论坛”在苏州国际博览中心隆重举行。本次论坛汇聚了来自高校、科研机构及企业的 300 余名专家学者，围绕异质集成材料、先进封装技术、热管理及产业化路径等前沿议题展开深度交流。

聚焦前沿技术：从材料创新到集成应用

论坛首日，西安电子科技大学教授郝跃发表开幕致辞，强调异质集成技术对突破半导体性能瓶颈的重要意义。中国国际科技促进会半导体产业发展分会副秘书长慕容素娟简要介绍了协会整体的业务，邀请更多的企业和专家参与合作和交流。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员欧欣分享了新型异质集成

Core Summary

From October 22 to 23, 2025, the 2025 Semiconductor Heterogeneous Integration and Advanced Packaging Technology Forum was held in Suzhou, co-organized by multiple institutions and attended by over 300 industry leaders. The forum focused on frontier topics such as heterogeneous integration materials, advanced packaging, and thermal management, featuring in-depth exchanges on key technologies including diamond-based materials, gallium nitride (GaN), and hybrid bonding, while exploring pathways toward localization and industrialization. Experts underscored the importance of strengthening end-to-end collaboration across the entire innovation chain—spanning materials, equipment, processes, and packaging—and called for building an open, standardized industrial ecosystem. Through 15 thematic presentations, roundtable discussions, and technology roadshows, the event fostered cross-sector cooperation, establishing an efficient platform to support China's semiconductor industry in overcoming performance bottlenecks and achieving high-quality development.

XOI 材料及器件研究进展，为高功率电子、光子及射频器件提供创新解决方案。国家第三代半导体技术创新中心（苏州）首席科学家梁剑波提出以“界面革命”为核心，通过金刚石、GaN 与 3D 键合技术破解“功耗墙”难题。

在圆桌讨论环节，中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员欧欣、国家第三代半导体技术创新中心（苏州）首席科学家梁剑波博士、吾拾微电子 CTO 蔡维伽、中电科风华信息装备股份有限公司高昆博士等嘉宾，围绕国产化进程、产业链协同、产业化落地等关键问题展开进一步探讨，指出需加强“材料 - 装备 - 工艺 - 封装”全链条协同创新，推动技术从“可用”到“好用”的跨越。

技术多元化突破：金刚石、GaN 与混合键合成焦点

次日论坛，涵盖了宽禁带半导体、热管理、键合工艺等 15 场专题报告。

第一场报告由美国国家发明家科学院院士、西交利物浦大学芯片学院院长陈伟教授分享异质集成在材料和应用方面的挑战问题及可能的战略探讨。

西安交通大学教授王宏兴展示了英寸级单晶金刚石外延生长技术突破；哈尔滨工业大学教授王晨曦提出低温混合键合方案，为三维异质集成提供新路径；西安电子科技大学副教授武玫针对 GaN 器件散热痛点，提出晶圆级热管理系统性解决方案。

甬江实验室金刚石半导体中心研究员邬苏东探讨了金刚石在大尺寸单晶 / 多晶晶圆生长和封装应用中存在的主要问题以及未来应对规划；中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员王跃忠（由其团队朱毅代讲）展示了 4 英寸级、厚度 200μm 内薄膜的制备技术，并讨论了单炉 5 件 4 英寸金刚石膜的批量化制备工艺，开发了低成本的快速“自剥离”



西安电子科技大学教授郝跃



中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员欧欣



中国国际科技促进会半导体产业发展分会副秘书长慕容素娟



国家第三代半导体技术创新中心 (苏州) 首席科学家梁剑波





左起依次为：王宏兴教授、王晨曦教授、武玫副教授



东南大学教授李力一



南京师范大学副教授周岩



甬江实验室研究员张瓦利



美国国家发明家科学院院士、西交利物浦大学芯片学院院长陈伟教授

技术；西安英特斯克半导体科技有限公司总经理赵亮汇报了其公司在 MPCVD 技术领域从“自动化”到“物联网化”，再进一步向“AI 化”进展的清晰发展路径。

南京师范大学副教授周岩阐述了团队采用 SAB 技术，在室温下实现无缓冲层 GaN/Si 直接键合，界面应力显著降低；东南大学教授李力一针对 W2W、D2W 混合键合的芯粒集成应用场景、设备、工艺、材料以及可靠性进行了深入探讨。

技术路演环节，中电科风华信息装备股份有限公司、吾拾微电子、杭州富加镓业科技有限公司、矽赫微科技（上海）有限公司展示了国产装备与工艺的最新进展。

推动产业生态共建：协同创新成共识

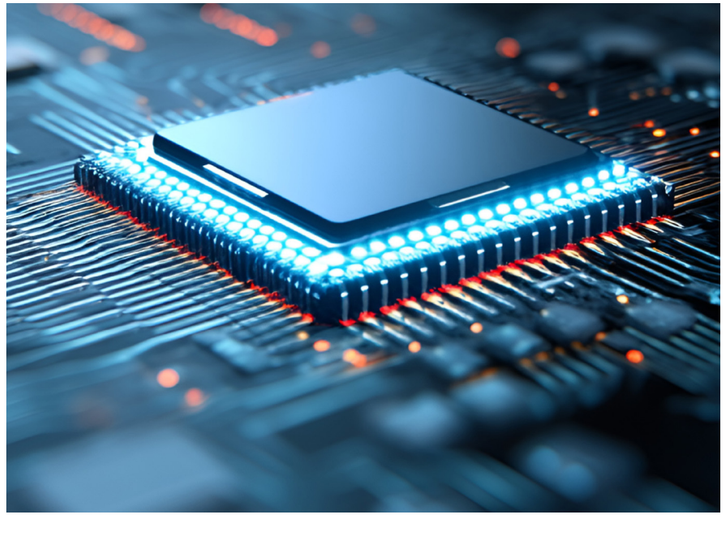
论坛闭幕环节，甬江实验室研究员张瓦利指出，微纳制造需攻克高深宽比结构、电镀均匀性等核心难题，并呼吁建立开放研发平台。

与会专家一致认为，异质集成技术的规模化应用需“产学研用”深度融合，构建标准化、开放化的产业生态。本次论坛通过技术分享、圆桌讨论与实地考察，为行业提供了高水平的交流平台，有效促进了产业链上下游协作。

论坛主办方相关负责人表示，未来，中国国际科技促进会半导体产业发展分会将持续推动关键技术创新与成果转化，助力中国半导体产业高质量发展。



左起依次为：邬苏东研究员、王跃忠研究员（团队朱毅）、赵亮总经理



中国国际科技促进会半导体产业发展分会
关于征集《介入式脑机接口临床与转化病房系统建设指南》等 12 项团体标准起草单位和起草人员的通知

各有关单位：

根据《国家标准化发展纲要》《“十四五”推动高质量发展的国家标准体系建设规划》《关于促进团体标准规范优质发展的意见》等文件要求，为充分发挥标准的基础性、战略性、引领性作用，切实做好标准编制宣贯工作，鼓励更多单位参加到标准制修订的过程中，提高标准质量，实现编制工作的开放性、公正性、透明性，提升标准的实用性和影响力，按照《中华人民共和国标准化法》《中国国际科技促进会团体标准建设管理办法》的相关规定，现公开征集半导体相关团体标准参编单位及标准编写起草人（制定标准项目详见列表）。现将有关具体事项通知如下：

序号	标准名称	主编单位	联系人
1	《2-4 英寸单晶金刚石衬底尺寸》	西安交通大学	康慷 18519520086
2	《介入式脑机接口临床与转化病房系统建设指南》	南开大学	
3	《可见光通信系统测试方法和技术要求》	南昌大学	
4	《Sn-Bi 高质量低温焊接材料》	哈尔滨工业大学	
5	《高后果区智能识别技术规范》	中国石油天然气管道工程有限公司	陶志伟 13121671070
6	《智能油气储运 设计规定 集中监视及报警管理应用建设》	中国石油天然气管道工程有限公司	
7	《智能油气储运大模型应用与建设要求》	中国石油天然气管道工程有限公司	
8	《智能计算中心赋能能力评估规范标准》	中国信息通信研究院	陶志伟 13121671070
9	《机器人产业数据资产质量评价规范》	中国科学院空天信息创新研究院	
10	《医护机器人数据安全评价体系技术规范》	中国科学院空天信息创新研究院	
11	《汽车 SoC 芯片温度场仿真分析技术规范》	中国汽车工程研究院股份有限公司	
12	《车规级芯片电特性测试参数及测量系统评价方法》	中国汽车工程研究院股份有限公司	

一、起草单位、起草人要求

1. 企业近三年（含成立不足三年）未发生较大及以上的安全、环保、质量等事故；

2. 起草单位应为标准所涉及的相关领域企事业单位，具有行业代表性以及较高的制造和科研水平，重视标准化工作；

3. 愿意承担开展标准化工作所需的资金、技术和人力支持；

4. 标准起草人应熟悉行业相关工作，具有丰富的实践经验和较高的理论水平，并能够参与标准起草的各项工作。

二、起草单位、起草人享有以下权利

1. 参与标准制定，成为标准起草组成员，并在标准文本中体现单位名称和起草人姓名（原则上每个单位限定为 1 人）；

2. 标准升级成国家标准、行业标准或修订时，优先享有参与标准制修订的权利；

3. 授予标准起草单位荣誉称号，并颁发企业起草单位、起草人证书；

4. 协助符合条件的企业开展“科技成果评价”。

三、起草单位、起草人将承担以下义务

1. 服从协会组织安排，能够积极参与该标准的启动、调研、征求意见、审查、报批等相关的各项事宜，按时完成标准起草组分配的各项工作任务；

2. 在标准起草过程中提供的信息真实、客观、科学。

四、申报要求

请申请参与标准起草的相关单位填写《起草单位及起草人确认表》，或直接联系相关标准负责人咨询参编事宜。

中国国际科技促进会

半导体产业发展分会秘书处

2025 年 11 月

解码新周期下的投资新机

本期《商机快报》栏目，我们聚焦半导体、AI算力、进出口贸易等核心赛道，网罗中外产业重磅动态与投资商机。中国首片大尺寸封装级载板下线、首款全国产通用 GPU发布，核心技术自主化再破局；深圳半导体产业基金揭牌、2025年前三季度机电产品出口增长 9.6%，产业升级与外贸提质双向发力。国际端，台积电净利润创新高、英伟达千亿投资 OpenAI布局 AI基建，行业巨头竞逐先进制程与算力赛道；稀土出口管制引发跨境经贸互动，相关产业格局迎来新调整。一系列重磅消息背后，是新质生产力加速崛起的产业机遇。

栏目主持 / 田 也

中国首片大尺寸封装级载板下线



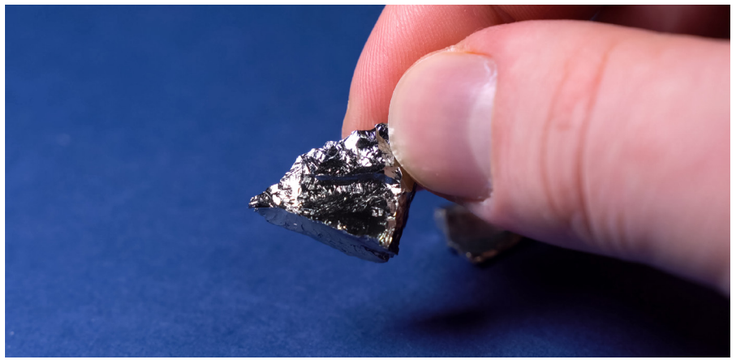
9 月 19 日，随着机械臂稳稳地将约 0.3mm 厚、7 ㎡面积大小的载板抓取成功，中国首片大尺寸封装级载板在浙江星柯先进光电显示产业基地正式下线。

据介绍，在精密检测仪器下，该产品各项性能指标均达到国际先进水平，将广泛地应用于 2.5D/3D 先进封装及半导体显示领域。该产品的成功批量化生产，将成为中国电子信息产业从核心技术与成套装备到高端制造实现全面自主可控的重要一环，同时也将为浙江省光电信息产业上游核心材料环节补链强链贡献重要力量。（来源：星科光电）

Core Summary

In this edition of Business Opportunity Flash, we spotlight core sectors including semiconductors, AI computing power, and import-export trade, capturing major global and domestic industry developments and investment opportunities. On the domestic front, China has achieved new breakthroughs in technological self-reliance: the country's first large-format packaging-grade substrate rolled off the production line, and the first fully domestically developed general-purpose GPU was launched. Meanwhile, the Shenzhen Semiconductor Industry Fund was officially inaugurated, and China's exports of mechanical and electrical products rose by 9.6% year-on-year in the first three quarters of 2025—demonstrating dual momentum in industrial upgrading and high-quality trade expansion. Internationally, TSMC reported record-high net profits, while NVIDIA announced a $100 billion investment in OpenAI to bolster AI infrastructure, as industry giants race to dominate advanced process nodes and computing capacity. Additionally, China's export controls on rare earths have triggered cross-border trade responses, prompting a realignment of related global supply chains. Behind these landmark developments lies a surge of opportunity driven by the rapid rise of new quality productive forces.

中国商务部宣布加强稀土相关物项出口管制



10 月 9 日，中国商务部发布两项关于加强稀土相关物项出口管制的公告，对含有中国成分的部分境外稀土相关物项以及稀土相关技术实施出口管制。

商务部新闻发言人当日表示，稀土相关物项具有军民两用属性，对其实施出口管制是国际通行做法。一段时间以来，部分境外组织和个人将原产中国的稀土管制物项直接或者加工后再转移、提供给有关组织和个人，直接或间接用于军事等敏感领域，对中国国家安全和利益造成重大损害或潜在威胁，对国际和平稳定造成不利影响，也有损防扩散国际努力。中国政府依法对含有中国成分的部分境外稀土相关物项实施管制，目的是更好维护国家安全和利益，更好履行防扩散等国际义务。

发言人强调，此次纳入管制的物项范围有限，同时将采取多种许可便利措施。对于符合相关规定的，中国政府将予以许可；对于最终用途为紧急医疗、应对公共卫生突发事件、自然灾害救助等人道主义救援的出口，将豁免申请许可。此外，考虑到各利益相关方履行既有商业合同及满足合规要求等实际需要，本政策设置了合理的过渡期。

（来源：中国新闻网）

前三季度中国出口机电产品总值同比增长 9.6%



10 月 13 日，中国国务院新闻办公室举行新闻发布会，海关总署相关领导介绍 2025 年前三季度进出口情况。

据介绍，随着新质生产力不断发展，重点产业提质升级，中国出口产品持续向新向优。2025 年前三季度，中国出口机电产品 12.07 万亿元，增长 9.6%，占出口总值的 60.5%，提升了 1.4 个百分点。其中，出口电子信息、高端装备、仪器仪表等高技术产品分别增长 8.1%、22.4% 和 15.2%；“新三样”产品、铁道电力机车等绿色产品增速均达到两位数。

（来源：中国政府网）

深圳市半导体与集成电路基金一期揭牌



10 月 15 日，深圳市半导体与集成电路产业投资基金（赛米产业基金）正式揭牌。该基金首期规模 50 亿元，存续期为 10 年，管理人分别是深创投下属全资企业福田红土、深重投下属全资企业重投资本，投资阶段以初创期、成长期为主。

据介绍，该基金的投资方向主要包括半导体和零部件、芯片设计和先进封装领域。其中，半导体和零部件主要是协助龙头企业并购关键装备以保持领先，协助高潜质企业横向、纵向整合成为大平台，核心装备重点投资，查缺补漏突破先进制程；芯片设计主要是布局人工智能芯片、新型计算架构等前沿领域，协助有潜力的 EDA、核心 IP 公司培养国际竞争力；先进封装则是帮助封装领域龙头和先进封装细分领军企业做大做强，同时布局具备突破海外先进封装专利封锁技术的早期高成长性团队。

（来源：每日经济新闻）

台积电第三季度净利润再创新高



10 月 16 日，台积电公布了 2025 年第三季度财报，营收和净利润都取得明显增长。从经营数据看，第三季度台积电合并营收 9899.2 亿元新台币，同比增长 30.3%。以美元计算，该季度台积电营收 331 亿美元。该季度台积电净利润 4523 亿元新台币，同比增长 39.1%，净利润创历史新高。毛利率为 59.5%，环比提升 0.9 个百分点。

台积电 CEO 魏哲家谈到第三季度收入增长的推动力，称得益于市场对先进制程的强劲需求。就先进封 装 CoWoS（Chip-on-Wafer-on-Substrate）的产能，魏哲家表示，台积电正在努力缩小供需之间的差距，并努力提升 2026 年的产能，与 AI 相关的一切，产能都非常紧张。就先进工艺的生产规划，他表示，2nm 制程将会在本季度晚些时候量产，A16 制程（台积电 1.6 纳米级工艺）有望在 2026 年下半年量产。

资本支出规划方面，台积电上调了今年资本支出规划的上限。管理层表示，台积电今年前 9 个月的资本支出共 293.9 亿美元，公司正在将 2025 年资本支出金额控制在 400 亿美元 -420 亿美元之间，而之前公司设定的预算范围是 380 亿美元 -420 亿美元。

（来源：第一财经）

首款中国国产通用 GPU 芯片发布



10 月 19 日，沐曦集成电路（南京）有限公司在南京公开发布中国首款国产通用 GPU——曦云 C600，标志着中国国产高性能 GPU 实现历史性突破。

据介绍，这款完全本土化的芯片集成了大容量存储与多种精度混合算力，并支持 MetaXLink 超节点扩展技术，在硬件性能和软件兼容上完全满足下一代生成式 AI 的训练和推理需求。

作为决定算力水平的关键组件，GPU 芯片的性能不仅左右 AI 模型训练和推理的能力，更是未来经济的基础。“在算力成为数字经济‘硬通货’的背景下，通用 GPU 芯片将是国与国之间的终极博弈。”沐曦股份相关负责人表示。

（来源：新华日报）

英伟达计划投资 OpenAI1000 亿美元用于新一代系统部署



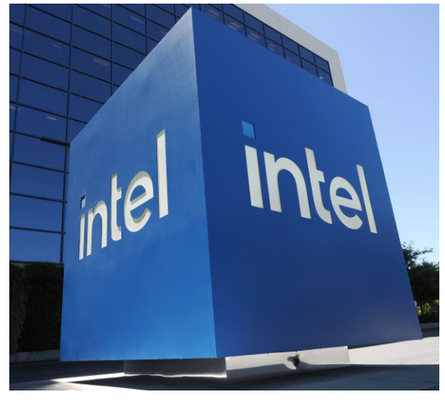
9 月 22 日，英伟达和 OpenAI 宣布达成战略合作协议，双方计划部署至少 10GW 的英伟达系统，用于 OpenAI 的下一代 AI 基础设施，以训练和运行新模型。

据介绍，为支持此次部署（包括数据中心与电力容量），英伟达计划在新一代系统部署过程中对 OpenAI 投资最高达 1000 亿美元。首批设施预计将在 2026 年下半年上线，并采用 NVIDIA Vera Rubin 平台。

目前，OpenAI 的周活跃用户已超 7 亿。在 AI 工厂扩张计划中，OpenAI 将把英伟达列为首选战略算力与网络合作伙伴。双方将协同优化路线图，涵盖 OpenAI 的模型及基础设施软件，以及英伟达的硬件与软件。

（来源：英伟达）

《华尔街日报》曝英特尔将吸纳苹果与台积电入股推动公司转型



9 月 25 日，《华尔街日报》报道指出，英特尔正积极寻求外部投资及伙伴关系，以进一步推动公司转型。

根据知情人士的说法，英特尔除了与苹果接触之外，似乎也已经与台积电正在洽谈，讨论在制造业方面的投资或建立伙伴关系的可能性。不过，英特尔与台积电的合作讨论并非首次浮现，这两家公司曾讨论过一份初步协议，计划成立一家合资企业，其中台积电将持有这家新公司 20% 的股份。

据报道，英特尔积极寻求外部投资的努力已经初见成效。美国总统特朗普政府 9 月就已宣布对英特尔投资 89 亿美元，以换取 9.9% 的股权；日本软银也宣布对英特尔投资 20 亿美元；英伟达也宣布对英特尔投资 50 亿美元，并与英特尔展开在服务器与 PC 处理器上的合作。

（来源：华尔街日报）

美针对中方稀土出口管制将对中方加征 100% 关税



当地时间 10 月 10 日，美国总统特朗普在社交媒体上发文宣称，自 11 月 1 日起，将对中国额外加征 100% 的关税，以回应中国稀土出口管制新决定。同时，将对“所有关键软件”实施出口管制。

对此，中国商务部回应称，对于关税战，中方的立场是一贯的，我们不愿打，但也不怕打。中方敦促美方尽快纠正错误做法，以两国元首通话重要共识为引领，维护好来之不易的磋商成果，继续发挥中美经贸磋商机制作用，在相互尊重、平等协商基础上，通过对话解决各自关切，妥善管控分歧，维护中美经贸关系稳定、健康、可持续发展。如果美方一意孤行，中方也必将坚决采取相应措施，维护自身正当权益。

（来源：中国政府网）



半导体视界
Semiconductor Horizons

芯界语录



低估中国的实力和华为惊人的竞争精神是愚蠢的，这是一家拥有非凡技术的公司。伤害中国的事情，往往也可能伤害美国，甚至更严重。

——黄仁勋（英伟达创始人兼 CEO）



在摩尔定律不再奏效的同时，中国将受益于新的封装技术。凭借在应用和封装技术方面的优势，中国的芯片产业将在 3 至 5 年内实现“爆炸式增长”，为中国克服美国的技术限制开辟道路。

——陈南翔（中国半导体行业协会理事长、长江存储董事长）



美光已在中国投资超过 110 亿人民币，未来我们会抓住中国更多的机会，我们将继续共同塑造中国以及全球半导体行业的未来。

——桑杰 · 梅赫罗特拉（美光科技总裁兼 CEO）



由于生产能力建设速度太慢，欧洲将无法实现到 2030 年将全球计算机芯片市场份额提升至 20% 的目标。作为世界第二大经济体和最大工业国，中国对芯片的需求几乎是无底的，对所谓中国过度投资芯片产业的担忧是错误的。

——彼得 · 温宁克（阿斯麦前 CEO）



半导体行业最重要的资产是信任，信任是需要赢得的，我们需要通过我们的产品来赢得信任，并不是单凭感觉，这是一种承诺，并不是技术术语。世界对我们有三个要求：安全性、加密性、可靠性。

——陈志宽（新思科技总裁）

半导体行业的机遇与展望

——《电子信息制造业 2025-2026 年稳增长行动方案》政策解析

文 / 潘 菲

Core Summary

In September 2025, China's Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) and the State Administration for Market Regulation jointly issued the Action Plan for Steady Growth in the Electronics Information Manufacturing Industry (2025–2026), providing a two-year development roadmap for the electronics information manufacturing sector and the semiconductor industry. Aligned with the national "AI+" initiative, this policy creates a synergistic "triple resonance" of policy support, technological advancement, and capital investment, targeting goals of localization, high-end upgrading, and internationalization.

The plan sets key targets, including an average annual increase of around 7% in value-added output and over 5% in revenue, along with structural objectives such as server deployment scale and penetration rate of premium TVs. The plan focuses on deploying tasks to optimize supply (including AI terminal upgrades, 5G/6G technology breakthroughs, and RISC-V ecosystem development), expand demand (through BeiDou applications, advanced computing, and cross-sector integration), and strengthen innovation (via platform building and frontier technology R&D), supported by safeguard measures such as industry-finance collaboration and dynamic monitoring, thereby opening up broad market opportunities for the semiconductor industry and driving its technological breakthroughs and scale-up.

一、政策背景与战略意义

《电子信息制造业 2025—2026 年稳增长行动方案》（以下简称《行动方案》）由中国工业和信息化部与国家市场监督管理总局于 2025 年 9 月 4 日联合印发，为电子信息产业未来两年发展提供了系统性指引。该政策的出台背景在于电子信息制造业已成为稳定工业经济增长的关键领域，在今年上半年已展现出强劲增长态势，规模以上电子信息制造业增加值同比增长 11.1%，分别高于工业和高技术制造业 4.7 和 1.6 个百分点。

作为国民经济的先导性、基础性、战略性产业，电子信息制造业的稳定增长直接关系到工业经济整体表现与国家政治经济安全。特别是在全球半导体竞争加剧、产业链供应链面临重构的背景下，《行动方案》的出台不仅是为了巩固当前增长势头，更是为了应对全球市场竞争和技术变革的双重挑战。

对于半导体产业而言，此政策与《“人工智能 +”行动》形成共振效应，共同构建了“AI 深度融合社会经济”的新蓝图。政策旨在通过系统性支持和多维度的举措，推动半导体产业向自主化、高端化、国际化方向迈进，为行业带来“政策 + 技术 + 资本”的三重共振。

二、核心目标与预期蓝图

《行动方案》设定了一套完整的指标体系，既有规模速度类指标，也有质量效率类指标，体现了量质并重的发展思路。

1. 规模增长目标

行业增长指标：2025 年至 2026 年，规模以上计算机、通信和其他电子设备制造业增加值平均增速保持在 7% 左右，加上锂电池、光伏及元器件制造等相关领域后，电子信息制造业年均营收增速达到 5% 以上。

国际竞争地位：到 2026 年，实现营收规模和出口比例在 41 个工业大类中保持首位。

2. 产业结构目标

细分领域目标：服务器产业规模超过 4000 亿元，75 英寸及以上彩色电视机国内市场渗透率超过 40%，个人计算机、手机向智能化、高端化迈进。

技术突破方向：强化集成电路、先进计算、未来显示、新型工业控制系统等领域科技创新，支持人工智能、先进存储、三维异构集成芯片、全固态电池等前沿技术基础研究。

3. 区域发展目标

产业集群培育：实现 5 个省份的电子信息制造业营收过万亿元，形成集群发展优势。

目标类别	关键指标	目标值
增长目标	电子设备制造业增加值年均增速	7% 左右
	电子信息制造业年均营收增速	5% 以上
产业结构目标	服务器产业规模	超过 4000 亿元
	75 英寸以上电视渗透率	超过 40%
	营收和出口地位	41 个工业大类首位
区域发展目标	营收过万亿省份数量	5 个

三、重点任务与产业机遇

《行动方案》从优供给、扩需求、强创新三个维度部署了 16 项具体任务，形成了系统完整的政策框架。对于半导体行业而言，这些任务蕴含着丰富的产业机遇和发展方向。



人工智能终端升级

1. 优供给：深化产业转型升级

在优供给方面，《行动方案》提出推动电子整机高端化，促进人工智能终端迈向更高水平智能创新，这将直接带动高端芯片与核心半导体组件的需求。

人工智能终端升级：推动智能体与终端产品深度融合，制定人工智能终端智能化分级方法和标准，鼓励各地推动人工智能终端创新应用，这一举措将刺激 AI 芯片、传感器和边缘计算半导体的市场需求。

通信技术攻关：明确加快 5G/6G 关键器件、芯片、模块技术攻关，加强 6G 技术成果储备，夯实通信产业技术底座，为化合物半导体、射频芯片和毫米波器件提供了明确的发展方向。

产业生态建设：加快推动 RISC-V 产业发展，促进产品技术研发、标准体系建设、应用落地和国际化合作，为中国在芯片架构领域实现自主可控提供了政策支持。

2. 扩需求：深挖市场潜力

在扩需求方面，《行动方案》提出扩大新场景，培育新业态，为半导体产品开辟了更广阔的应用空间。

北斗应用深化：构建基于北斗的精准时空信息服务体系，促进北斗与人工智能、智能网联汽车、低空经济等领域深度融合，带动导航定位芯片、高精度时序器件的专用需求。

先进计算系统建设：推进人工智能服务器、高效存储等先进计算系统建设，赋能科学研究、自动驾驶、生物医药等高算力场景，直接推动服务器芯片、存储控制器和加速计算芯片的研发与应用。

跨界融合领域：支持汽车电子、海

洋电子、航空电子、医疗电子等产业发展，这些新兴应用领域将为车规级芯片、医疗电子半导体和工业级电子元件创造新的市场增长点。



人工智能服务器、高效存储等先进计算系统建设赋能科学研究、自动驾驶、生物医药等高算力场景

3. 强创新：建设现代化产业体系

在强创新方面，《行动方案》着力推动科技创新与产业创新融合，为半导体产业技术突破提供了系统性支持。

创新平台建设：加强电子信息领域制造业创新中心等创新平台建设，强化行业关键共性技术供给。这对于解决半导体领域的基础工艺和材料问题具有重要意义。

前沿技术研究：支持人工智能、先进存储、三维异构集成芯片、全固态电池等前沿技术方向基础研究，打通半导体产业未来发展的核心技术轨道。

光子领域布局：面向光子领域重点环节开展技术攻关，加大对高速光芯片、光电共封等领域的研发投入力度，着力布局光电子芯片这一未来产业竞争高地。

四、政策亮点与实施保障

《行动方案》展现了多项政策创新，其中最为突出的是其对时空信息产业的前瞻性布局和全链条支持体系。

1. 时空信息产业新蓝海

《行动方案》明确提出谋篇布局时空信息产业，一体推进卫星定位、导航、授时、遥感、地理信息系统（GIS）、通信、网络等协同发展。这一布局突破了传统电子信息产业边界，将为半导体行业创造全新的增量市场，特别是对导航芯片、星载半导体和高精度授时器件提出了明确需求。

2. 产融合作模式创新

在产融合作方面，方案提出构建与产业创新相适应的金融服务体系——

基金引导：发挥好国家集成电路产业投资基金、制造业转型升级基金、国家中小企业发展基金等产业基金引导作用。

专项支持：实施“科技产业金融一体化”专项，指导耐心智慧资本投早、投小、投长期、投硬科技。

退出机制：鼓励企业合理兼并重组、转型升级等，促进“募投管退”良性循环。

这些举措直指半导体产业资金密集、投资周期长的特点，有助于解决行业融资瓶颈。

3. 配套保障与实施机制

为确保政策落地见效，《行动方案》提出了一系列保障措施——

政策宣贯：组织开展多种形式的政策宣贯，指导各地工业和信息化主管部门结合实际完善政策配套措施。

动态监测：每季度开展稳增长专题调研，大力挖掘地方、协会商会、企业稳增长典型案例，总结提炼和推广可借鉴的好经验好做法。

分类指导：推动电子信息制造业营收前 13 名的重点大省（市、区）奋勇争先，实行台账式管理，定期评估各项举措落实情况。

这种动态调整的机制增强了政策的适应性与有效性，通过持续适应环境变化来优化方案逻辑与实用性。

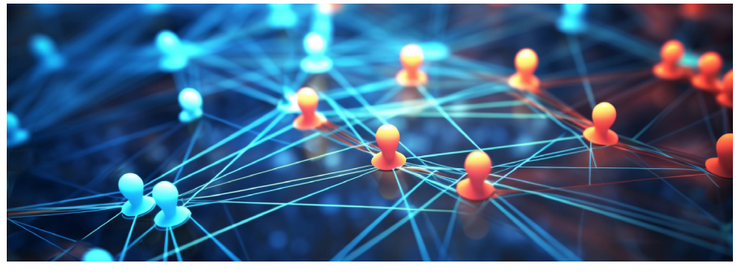
4. 与“人工智能 +”政策协同

《行动方案》与国务院《关于深入实施“人工智能 +”行动的意见》形成了紧密的政策协同。到 2027 年，人工智能与 6 大重点领域广泛深度融合，新一代智能终端、智能体等应用普及率超 70%，这将为半导体产业创造稳定的市场需求，特别是 AI 芯片和智能终端半导体领域。

《电子信息制造业 2025—2026 年稳增长行动方案》的发布实施，为半导体产业提供了前所未有的发展机遇。政策从供给侧的技术攻关、需求侧的市场拓展和生态侧的产融结合三个维度，构建了支持产业发展的良性循环机制。

到 2026 年，当行动方案的目标全面实现时，中国半导体产业有望在自主化程度、技术水平和产业规模上迈上新台阶，为电子信息制造业的稳定增长和高质量发展提供坚实支撑。作为半导体行业协会，我们建议会员企业深入研究政策方向、积极对接资源、加大创新投入，共同推动中国半导体产业实现新一轮高质量发展。

（作者系中国国际科技促进会半导体产业发展分会副秘书长）



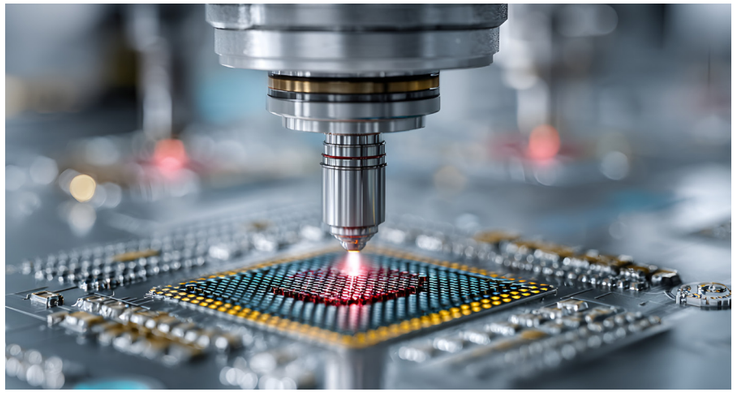
多维发力驱动产业自主可控

——2025 年 1-8 月中国半导体产业政策汇总集锦

文 / 潘 菲

Core Summary

From January to August 2025, Chinese national ministries and local governments intensively rolled out supportive policies for the semiconductor industry, focusing on technological self-reliance and supply chin security, demonstrating precision, diversification, and regional differentiation. These policies span seven key dimensions: on the technology front, they provide support through wafer tape-out subsidies, "challenge-based" innovation programs (“Jiebang Guaishuai”), and other measures targeting breakthroughs in EDA tools and advanced process nodes;



2025 年，中国半导体产业迎来了新一轮政策支持热潮。从国家部委到地方政府，一系列涵盖技术攻关、资金扶持、生态构建、人才引育的政策措施密集落地，呈现出精准化、多元化、差异化的显著特征，共同推动中国半导体产业向技术自主可控和产业链安全的目标迈进。

一、技术突破与研发支持

1. 北京海淀区：流片补贴分级激励

2025 年 2 月 11 日，北京海淀区发布《中关村科学城集成电路流片补贴申报指南》，对从事集成电路设计的企业给予精准流片补贴。对境内开展先进制程（14nm 及以下）首轮流片的企业，按流片费用 30% 予以奖励，上限 800 万元；对成熟制程（14nm 以上）的企业补贴 20%，上限 500 万元。此举旨在降低企业研发成本，加速技术迭代。

2. 上海市：基础研究专项资助

上海市科学技术委员会于 2025 年 8 月发布《2025 年度基础研究计划“集成电路”（第二批）项目申报指南》，聚焦设计、制造工艺、材料等前沿领域，单个项目最高资助 100 万元，项目执行周期至 2027 年 9 月，旨在强化底层技术支撑。

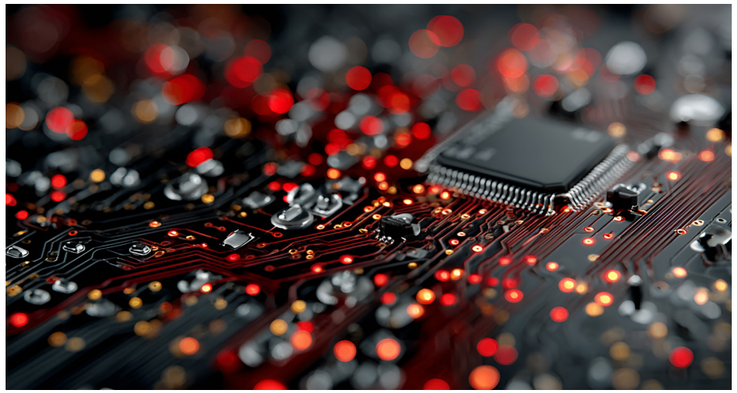
3. 深圳市：“揭榜挂帅”攻关机制

2025 年 7 月 30 日，深圳市科技创新局发布《2025 年度重点产业研发计划（第一批）项目申请指南》，将半导体与集成电路列为重点领域，采取“揭榜挂帅”模式支持关键核心技术攻关，单个项目资助强度最高不超过 3000 万元，以提升体系化攻关能力。

4. 国家层面：统筹前沿技术研发

工业和信息化部、市场监督管理总

along the industrial chain, they strengthen collaboration across design, manufacturing, and packaging/testing while fostering regional clusters; on the financial side, they establish multi-billion-yuan-level merger & acquisition funds and industrial investment funds to offer diversified support; meanwhile, complementary measures include talent attraction and cultivation, tax incentives, and public service enhancements. Regionally, the Yangtze River Delta, Pearl River Delta, and Central & Western China adopt differentiated development strategies to avoid homogenized competition. Collectively, these policies create a synergistic framework integrating technology, capital, ecosystem, and regional coordination, aiming to overcome "chokepoint" bottlenecks and solidify the foundation for sustainable industry growth.



局于 2025 年 8 月印发的《电子信息制造业 2025 — 2026 年稳增长行动方案》中明确提出，通过国家重点研发计划相关领域重点专项，持续支持集成电路、先进计算、三维异构集成芯片等领域的科技创新。同时，加快推动 RISC-V 产业发展，并面向高速光芯片、光电共封等光子领域重点环节开展技术攻关。

二、产业链协同与生态构建

1. 浙江省杭州市萧山区：全链条补助机制

2025 年 5 月 27 日，杭州市萧山区发布《关于促进集成电路产业高质量发展的若干政策》，对制造、封测、装备、材料类重大项目最高按照研发投入的 30%、设备投入的 20% 予以补助，最高 1 亿元；对 EDA 工具攻关企业最高补助 2000 万元，着力推动“设计 - 制造 - 封测”一体化发展。

2. 广东省：重大项目集群化推进

中共广东省委办公厅、广东省人民政府办公厅印发的《广东省建设现代化产业体系 2025 年行动计划》提出，加快华润微、粤芯等重大项目建设和产能“爬坡”，补齐制造与封测短板，并谋划建设光芯片产业创新平台，通过项目牵引形成产业集群效应。

3. 重庆市高新区：供应链协同奖励

2025 年 4 月 30 日，重庆高新区发布《重庆高新区促进集成电路产业高质量发展的若干措施》，设立供应链协同奖励，对采购非关联企业产品的企业最高奖励 1000 万元，以强化本地化配套能力。同时，对公共服务平台建设最高奖励 3000 万元，完善产业基础设施。

4. 广州市：优化产业布局

《广州开发区黄埔区支持集成电路产业高质量发展若干政策措施》提出，支持优势资源和优质企业向园区集聚，打造涵盖设计、制造、材料、装备、封测等环节的全产业链，建设综合性集成电路产业聚集区。

三、资金扶持与金融创新

1. 广州市：流片与产业化双轮驱动

2025 年 6 月 16 日印发的《广州开发区黄埔区支持集成电路产业高质量发展若干政策措施》明确，对流片费用补助 40%，每家企业每年最高 500 万元；对固定资产投资超 1000 万元的产业化项目，按设备投资 15% 给予扶持，最高 1000 万元。

2. 上海市：百亿级并购基金落地

2024 年 12 月，上海市政府办公厅发布《上海市支持上市公司并购重组行动方案（2025-2027 年）》，提出设立 100 亿元集成电路设计产业并购基金，目标到 2027 年培育 10 家具有国际竞争力的上市公司，形成 3000 亿元并购交易规模。

3. 深圳市：50 亿元产业基金引领

深圳市发展和改革委员会于 2025 年 7 月出台的《深圳市关于促进半导体与集成电路产业高质量发展的若干措施》，设立了总规模 50 亿元的“赛米产业私募基金”，聚焦前沿技术研发与生态整合，通过“产业 + 资本”模式导入全球资源。

四、人才引育与公共服务

1. 杭州市萧山区：“芯机联动”奖励机制

萧山区政策鼓励终端厂商采购非关联企业自主研发产品，对年度采购额超 1000 万元的企业按金额分档给予奖励，推动芯片与整机协同创新。

2. 重庆市高新区：公共服务平台建设

对硅光 EPDA 平台等公共服务平台建设最高奖励 3000 万元，对设备、材料验证最高奖励 500 万元，以此完善产业基础设施。

3. 北京市：高层次人才资助计划

2025 年 2 月，北京海淀区在发布流片补贴政策的同时，也明确支持集成电路领域留学人才回国创业，对入选“鲲鹏行动”计划的专家给予“一事一议”支持，强化人才梯队建设。

五、税收优惠与降本增效

1. 国家层面：税收清单动态管理

2025 年 3 月 27 日，国家发展改革委等部门联合发布《关于做好 2025 年享受税收优惠政策的集成电路企业或项目、软件企业清单制定工作的通知》（发改高技〔2025〕385 号），明确了 2025 年享受税收优惠政策的企业清单制定工作，符合条件的企业可享受企业所得税减免、研发费用加计扣除等政策。

2. 增值税加计抵减政策延续

此外，工业和信息化部、国家发展改革委、财政部、税务总局于 2025 年 9 月联合印发通知，部署开展 2025 年度享受增值税加计抵减政策的集成电路企业清单制定工作，确保了税收优惠政策的连续性和稳定性。

3. 江苏省：所得税优惠细化流程

2025 年 4 月，江苏省财政厅发布《关于享受集成电路和软件产业企业所得税优惠政策有关事项的通知》，细化了清单管理与转请核查方式，确保政策能够精准落地。

六、区域特色化布局

1. 长三角：差异化协同发展

上海浦东新区：在 2025 年 2 月和 7 月分批次支持 IP 购买、首轮流片，强化产业链韧性。

江苏苏州：对 AI 芯片企业并购重组给予奖励，推动垂直整合制造模式（IDM）。

浙江宁波：落实集成电路企业增值税加计抵减政策，壮大数字制造业。

2. 珠三角：前沿领域卡位战

深圳宝安区：规划石岩第三代半导体产业园，聚焦碳化硅、氮化镓材料。

广州南沙区：建设化合物半导体集聚区，推动 5G 通信芯片量产。

3. 中西部：特色工艺突破

重庆：依托华润微电子 12 英寸产线，填补车规级功率芯片空白。

成都：联合微电子中心实现 28 纳米硅光芯片量产，降低智能汽车硬件成本。

七、政策趋势与产业机遇

2025 年上半年的政策呈现出三大核心趋势：

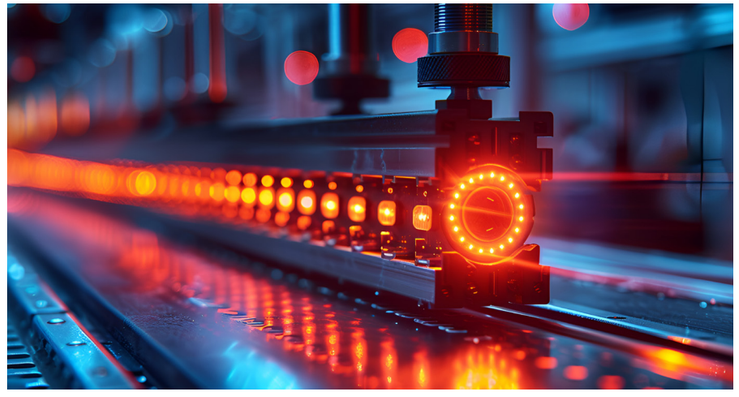
1. 技术攻坚精准化：政策资源集中投向 EDA 工具、先进封装、第三代半导体等“卡脖子”环节，并通过“揭榜挂帅”等机制激发各类创新主体的活力。

2. 资金支持多元化：形成了国家基金、地方补贴、社会资本协同发力的多层次支持体系，致力于构建“研发 - 生产 - 应用”的良性闭环生态。

3. 区域协同差异化：长三角地区聚焦高端制造和生态构建；珠三角地区发力 AI 芯片与化合物半导体；中西部地区则在特色工艺和成熟制程上寻求突破，有效避免了同质化竞争。

随着这些政策红利的持续释放，中国半导体产业有望在 2025 年进一步夯实基础，在技术自主可控与产业链安全方面取得实质性突破，为参与全球竞争奠定更为坚实的基础。

（作者系中国国际科技促进会半导体产业发展分会副秘书长）



从全球芯片企业裁员潮透视产业重构逻辑

2025年全球芯片产业裁员潮席卷而来，英特尔、三星等巨头纷纷缩减规模。这场调整绝非简单的周期波动，而是技术迭代、市场分化、地缘博弈与人才结构错配交织的必然结果。透过裁员现象，可窥见产业从规模扩张向技术精耕转型的深层逻辑，见证全球半导体产业格局重构的阵痛与新生。

文 / 田 也

2025 年的全球芯片产业，正被一场规模空前的裁员潮所笼罩。英特尔不到两年间裁员超 5 万人，最终员工规模将压缩至 7.5 万人，应用材料因市场承压裁减 1400 名员工，三星在东南亚市场亦有 10% 的人员缩减。

这场波及产业链上下游的人员调整，绝非简单的周期性收缩，而是技术迭代、市场分化、地缘博弈多重力量交织下，产业生态重构的必然阵痛，折射出全球半导体产业正在经历的深层变革。

裁员潮背后，是技术路线剧烈转向引发的资源重新配置

当摩尔定律逼近物理极限，芯片产业正从单一制程竞赛转向“先进制程 + 系统创新”的双线突破，这种转型直接导致了人才需求的结构性失衡。

英特尔的裁员集中在传统 x86 架构工程师和中层支持岗位，被裁人员中仅 8% 为管理人员，其余多为技能适配不足的技术人员，而节省的资金正全力投向 18A 制程研发和 AI 芯片代工领域。与此同时，台积电、三星加速推进 2nm 制程量产，全环绕栅极晶体管技术成为新一代工艺的核心，传统 FinFET 技术相关岗位需求大幅萎缩。技术路线的迭代还催生了新的产业热点，Chiplet 异质集成技术的普及使 3D 封装工程师年薪中位数突破 45 万元，HBM4 内存技术的竞速发展让三星、SK 海力士等企业在存储领域持续扩产，这种“旧产能淘汰、新产能崛起”的更替直接反映在企业的人员结构调整中。

市场需求严重分化，进一步放大裁员潮的结构性特征

消费电子市场的持续疲软成为传统芯片企业裁员的直接诱因，全球半导体设备巨头美国应用材料公司因中国消费电子订单减少将损失 6 亿美元收入，被迫通过裁员降本增效，预计超过 1400 人将受到影响。

与之形成鲜明对比的是，AI 与汽车电子领域的爆发式增长成为产业仅有的增量引擎，这种需求端的“冰火两重天”加剧了企业的战略收缩与聚焦。

AI 服务器对存储的需求是传统服务器的 8-10 倍，推动 HBM 市场需求激增 200%，但全球仅三家企业具备量产能力，这使得资源向高端存储领域集中的同时，传统 DRAM 产能面临缩减压力。汽车电子领域同样呈现结构性机遇，L2+ 至 L4 级自动驾驶的商用化推动车规级芯片需求预计 2030 年达到 180 亿美元，蔚来、小鹏等车企自研芯片纷纷量产上车，而安世半导体因供应链动荡导致欧洲车企面临百万辆减产风险，更凸显了汽车电子供应链的战略价值。

企业为抢占增量市场，不得不裁减成熟领域人员，将资源投向高增长赛道，这种选择性布局构成了裁员潮的重要逻辑。

地缘政治博弈，成为裁员潮的隐性推手

美国对华技术封锁政策产生的反噬效应逐渐显现，不仅导致全球产业链割裂，更迫使跨国企业在“技术合规”与“市场份额”间艰难抉择。

英伟达因高端芯片出口限制失去中国市场，份额从 95% 骤降至 0%，2026 财年中国区收入缩水近 9 亿美元，被迫计提 100 亿美元资产减值，其裁员虽未公开披露，但资产减值背后的人员调整已不言而喻。阿斯麦虽凭借 DUV 设备在中国市场获得 42% 的销售占比，但在政策限制下无法输出 EUV 设备，而上海微电子已推出 7 纳米级 DUV 验证机，国产设备市场份额突破 40%，这种替代压力迫使阿斯麦重新评估全球产能布局。安世半导体事件更成为产业链区域化重构的典型注脚，其中国工厂占集团总产能 70%，荷兰政府的托管命令在中国遭遇“软抵抗”，最终引发欧洲车企的连锁震荡。

这种“区域化集群”取代“全球化分工”的趋势，使得企业需要调整不同区域的产能与人员配置，部分地区的裁员实则是产业链迁移的必然结果。

人才结构错配与区域竞争加剧，凸显裁员潮的深层矛盾

全球芯片行业正面临“低端岗位过剩、高端人才短缺”的结构性困境，中国芯片人才缺口达 30 万人，AI 芯片设计工程师年薪突破 70 万元，而传统制程工程师因技能过时被迫转型。英特尔俄勒冈工厂裁掉的数千名工程师中，不少人因缺乏 GAA 晶体管、RDL 工艺等新技术能力而难以适配新岗位，转型失败率高达 30%。

区域间的人才争夺更加剧了这种失衡，长三角占据中国芯片招聘需求的 50%，美国通过《芯片法案》吸引全球高端人才，使得中小芯片企业陷入“招人难、留人更难”的困境，部分企业因人才短缺导致项目延期，间接引发成本



Core Summary

In 2025, the global chip industry is experiencing a massive wave of layoffs, with companies like Intel, Applied Materials, and Samsung reducing their workforce. This wave of layoffs is not simply a cyclical contraction, but an inevitable consequence of industrial restructuring driven by a confluence of factors including technological iteration, market differentiation, geopolitical competition, and a mismatch in talent structure. Technologically, Moore's Law is nearing its limits, pushing the industry towards advanced processes and system innovation, leading to a shrinking demand for traditional technical positions and a shortage of talent in emerging technologies. On the market side, the sluggish consumer electronics market contrasts sharply with the explosive growth of AI and automotive electronics, prompting companies to accelerate the allocation of resources to high-growth sectors. Geopolitical tensions are exacerbating the regional restructuring of the supply chain, compounded by the global chip industry's structural dilemma of "a shortage of high-end talent and a surplus of low-end jobs," driving companies to optimize

personnel and production capacity. Essentially, this wave of layoffs is the growing pain of the industry's transition from scale expansion to quality improvement; in the future, companies that master core technologies will dominate the new landscape.

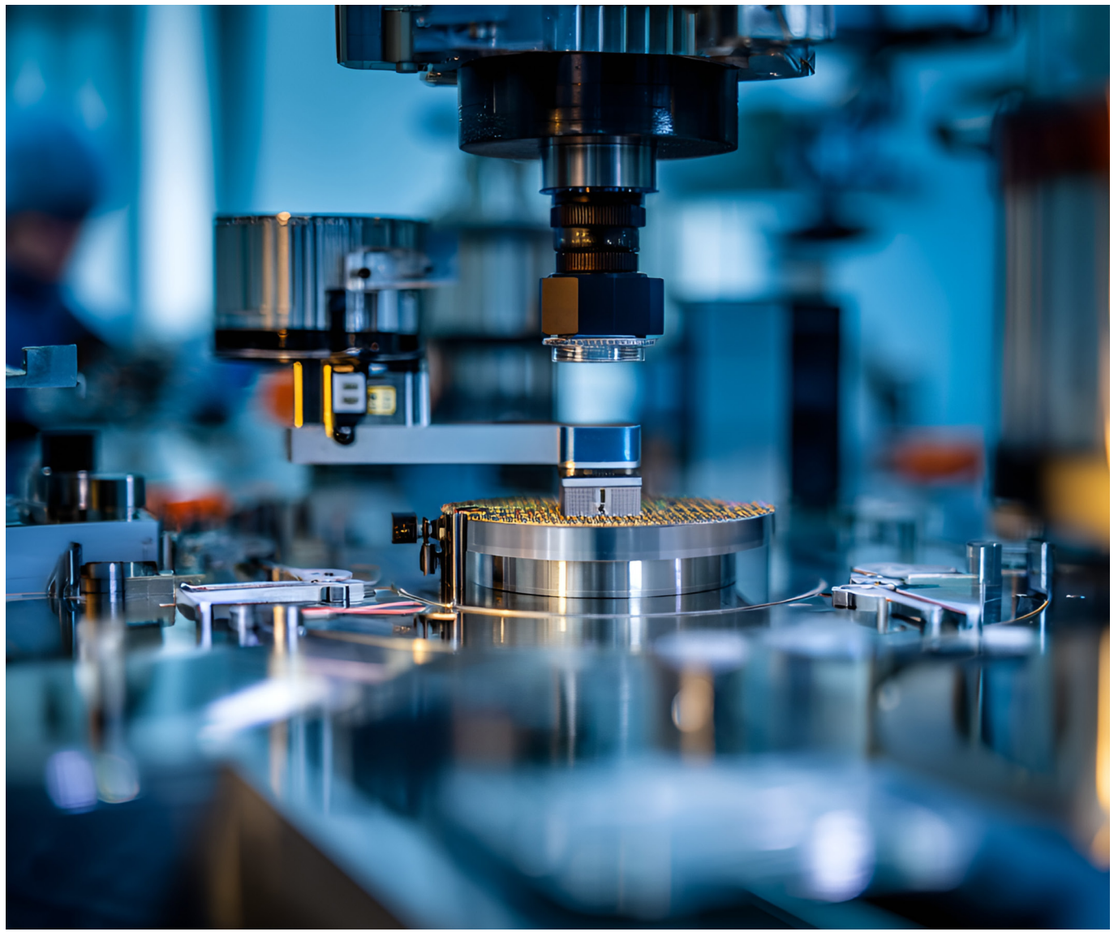
压力与人员优化。

人才市场的结构性矛盾，使得裁员并非简单的人员缩减，而是企业对人才结构的战略性重塑。

这场席卷全球的裁员潮，本质上是半导体产业从规模扩张向质量提升转型的必经阶段。英特尔将运营支出压缩至160亿美元，却不断加大对先进制程的投入；应用材料通过裁员应对短期损失，同时聚焦高端设备研发；中国本土企业则在替代浪潮中逆势扩产，寒武纪因性能突破实现营收千倍增长。这些现象共同指向一个结论:产业正告别“规模取胜”的粗放时代，进入“技术为王”的精耕阶段。

未来，掌握2nm/GAA工艺、HBM4存储、Chiplet封装等核心技术的企业将主导增长，而无法适配技术迭代与市场分化的企业将被淘汰。对于从业者而言，跨越周期的关键在于掌握前沿技能；对于国家而言，构建自主可控的产业链生态成为竞争核心。裁员潮带来的阵痛，终将孕育出更具韧性与效率的全球芯片产业新格局。

（作者系中国国际科技促进会半导体产业发展分会宣传部主任）



半导体视界
中国国际科技促进会主管 中国国际科技促进会半导体产业发展分会主办
国际标准刊号：ISSN3093-8430
深耕产业前沿
拆解技术硬核
解读政策风向
洞察产业趋势
共赴攻坚芯途
约访电话 Appointment Contact Number | 158-1121-5515
中国国际科技促进会半导体产业发展分会
地址：北京市丰台区汽车博物馆西路8号院3号楼2层203

前沿技术成果点亮创新版图

近期前沿技术领域成果频出。中国科学院苏州纳米所在 β-Ga_2O_3功率器件领域实现两项突破，创下超低漏电、最低比导通电阻等关键指标，为高压场景提供新方案；华为公布碳化硅散热相关专利，有效破解高功率芯片热功耗瓶颈。国际合作与产业创新同步推进，多国团队开发的化学液体沉积工艺实现纳米级精度涂层调控，DK联盟的中间形成层技术简化半导体玻璃基板工艺；谷歌 Willow量子芯片通过全新算法实现可验证量子优势，运算速度超最快超算 1.3万倍，为量子计算落地应用奠定基础。这些突破，正推动半导体、量子科技等领域迈向新高度。

栏目主持 / 田　也

苏州纳米所纳米加工平台在 β-Ga_2O_3 功率器件领域取得突破

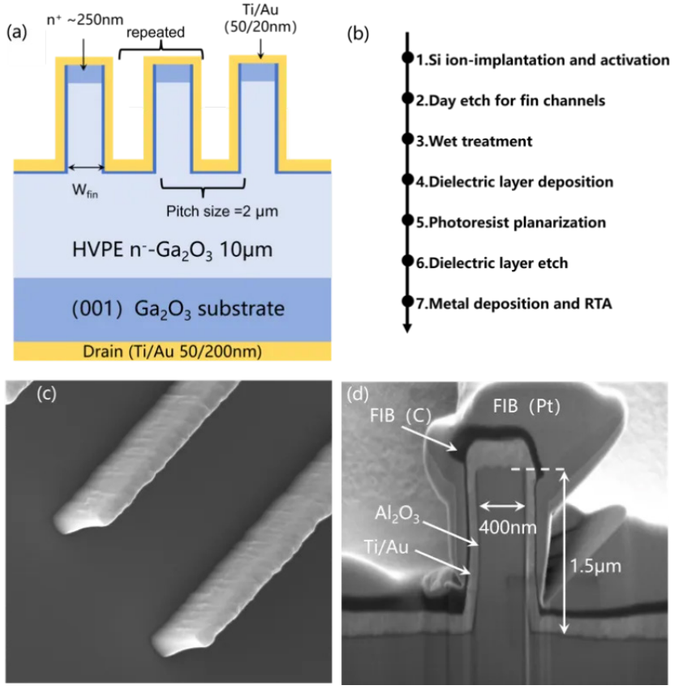


图 1：(a) 多鳍通道 β- Ga2O3 二极管的示意图；(b) 器件的关键工艺步骤；(c) 鳍干法蚀刻后的扫描电子显微镜（SEM）图像；(d) 鳍宽 400 nm 二极管 SEM 横截面图像

Core Summary

Cutting-Edge Technological Breakthroughs Illuminate the Innovation Landscape

Recent advances in frontier technologies have been rapidly emerging. The Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, has achieved two major breakthroughs in β-Ga_2O_3 power devices, setting new benchmarks for ultra-low leakage current and the lowest specific on-resistance—offering promising solutions for high-voltage applications. Huawei has unveiled a patent related to silicon carbide-based thermal management, effectively addressing the heat dissipation bottleneck in high-power chips. International collaboration and industrial innovation are advancing in parallel: multinational research teams have developed a chemical liquid deposition process enabling nanoscale-precision coating control; the DK Consortium's interlayer formation technology simplifies semiconductor fabrication on glass substrates; and Google's Willow quantum chip, powered by a novel algorithm, has demonstrated verifiable quantum advantage—performing computations over 13,000 times faster than the world's fastest supercomputer, laying a critical foundation for practical quantum computing applications. Together, these breakthroughs are propelling fields such as semiconductors and quantum technology to new heights.

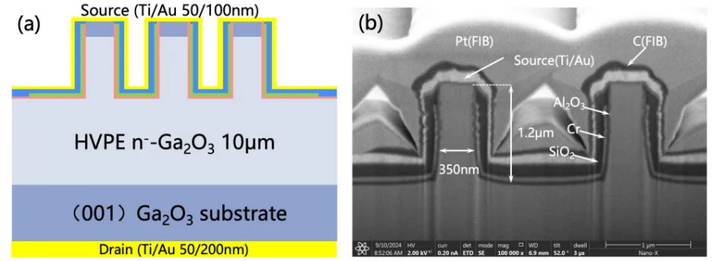


图 2：(a) 多鳍通道 β-Ga2O3FinFET 示意图；(b) 鳍宽 300 nm 二极管 SEM 横截面图像

9 月 10 日，从中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所获悉，该所纳米加工平台在氧化镓（β-Ga_2O_3）功率器件领域取得两项重要突破：首次基于纳米加工平台开发工艺制备了多鳍通道欧姆接触阳极 β- Ga_2O_3 二极管（MFCD），实现超低漏电的千伏级击穿电压；同时研制出高性能增强型垂直 β- Ga_2O_3 多鳍晶体管，创下 4.3 mΩ · cm^2 最低比导通电阻纪录。据悉，两项成果可为高温高压应用场景提供全新的解决方案。

多鳍通道二极管通过独创的欧姆接触阳极设计替代传统肖特基结构，结合亚微米鳍沟道引发的侧壁自耗尽效应，成功解决了宽禁带半导体器件在高电场下的漏电失控难题。在无任何场板或钝化层辅助的情况下，0.1μm 窄鳍器件展现出 -+35.1148V 击穿电压，反向漏电流稳定维持在 1μA/cm^2 的商用水平，且在 150℃高温环境下未出现性能衰减。欧姆接触的引入使比导通电阻降至 7mΩ · cm^2，较同类沟槽肖特基二极管降低 35%，这一突破性进展可为光伏逆变器、电动汽车快充桩等高压场景提供全新的解决方案。

增强型垂直晶体管通过双栅极鳍形沟道几何限域技术，无需依赖 p 型层即实现可靠常关特性，其阈值电压达 0.87V，开关比突破 7×10^6。创新地采用电子束光刻与非金属掩模刻蚀工艺，实现 350nm 鳍宽精度控制，配合双自对准平面化技术精准构筑源漏接触区。最终器件在 10V 工作电压下输出 760A/cm^2 的超高电流密度，比导通电阻仅 4.3mΩ · cm^2，同时维持 975V 击穿电压与 0.22GW/cm^2 的优异功率品质因数（PFOM），为数据中心电源及工业电机驱动芯片国产化奠定关键技术基础。

（来源：中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所）

华为公布两项芯片技术 破解高热功耗瓶颈

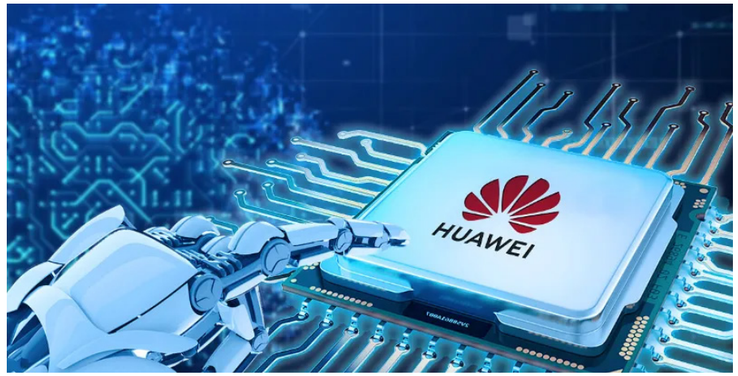
9 月 16 日，华为技术有限公司公布两项与碳化硅散热相关的专利，分别为《导热组合物及其制备方法和应用》和《一种导热吸波组合物及其应用》。

碳化硅材料具有优异的导热性能，仅次于金刚石。公开资料显示，碳化硅热导率达 500W/mK。相比之下，硅的热导率仅为约 150W/mK，陶瓷基板热导率约 200W/mK~230W/mK。此外，碳化硅热膨胀系数与芯片材料高度契合，既能高效散热，又能保障封装稳定性。采用碳化硅中介层后，可使 GPU 芯片的结温降

低 20℃ ~30℃，散热成本降低 30%，有效防止芯片因过热降频，保证芯片的算力稳定输出。

两项专利均采用碳化硅作为填料，旨在提高电子设备的导热能力。《导热组合物及其制备方法和应用》主要针对电子元器件的散热和封装芯片；《一种导热吸波组合物及其应用》则专注于电子元器件、电路板等应用领域。这些专利技术，旨在解决高功率芯片散热瓶颈问题。

（来源：新浪财经）



多国联合团队开发出化学液体沉积新工艺

9 月 12 日，从华东理工大学获悉，该校化工学院计算传递与原子级制造研究室庄黎伟团队、美国约翰霍普金斯大学 Michael Tsapatsis 团队联合美国布鲁克海文国家实验室、劳伦斯伯克利国家实验室等单位，合作开展了先进光刻胶的薄膜沉积法制备、多尺度模拟仿真和电子束光刻 / 超越极紫外光刻（Beyond EUVL）的国际交叉合作研究，相关研究论文以“Spin-on deposition of amorphous zeolitic imidazolate framework films for lithography applications”为题发表在国际知名学术期刊 Nature Chemical Engineering 上。

此次团队开发出名为“化学液体沉积”的新工艺，首次实现了在溶液中的硅片上大面积沉积咪唑基金属有机抗蚀剂，并能以纳米级精度调控涂层厚度。该方法通过调节金属种类与有机分子的组合，灵活调整材料对特定波长辐射的响应效率。

研究显示，至少有 10 种金属和数百种有机物可用于构建此类材料体系，为未来优化提供了广阔空间。例如，锌虽不适用于当前极紫外光刻，却在 B-EUV 波段表现出优异性能。团队表示，这项技术有望在未来十年内投入工业应用。

（来源：华东理工大学）

韩日合资公司 DK 联盟开发出中间形成层技术



100 微米玻璃基板 TGV Via 上的中间形成层结构图和均匀中间形成层横截面

据韩国媒体，9 月 22 日，韩日合资公司 DK 联盟宣布，已开发出一种“中间形成层”技术，该技术可简化半导体玻璃基板关键部件——玻璃价带电极（TGV）的电镀和金属化工艺。

据报道，该公司使用一种新型粘合溶剂在玻璃上涂覆一层称为中间形成层的超细薄膜，确保镀层的稳定形成。这提高了镀层和金属化的粘合强度，并增强了工艺均匀性。

基于这项技术，该公司计划开展多项业务。一是与拥有粘合溶剂和薄膜材料原创技术的日本企业合作；二是销售与分销粘合溶剂和薄膜材料；三是开发 TGV 和激光薄膜通孔钻孔、玻璃芯基板激光切割、封装激光粘合等设备工艺和系统。该联盟计划共同提供 TGV、电镀、金属化和切割等核心半导体玻璃基板工艺。此前，DK 联盟已经开发出实现 150:1 高深宽比 TGV 孔洞等关键技术。

（来源：艾邦半导体网）

谷歌首次实现可验证量子优势 比最快超算快 1.3 万倍

10 月 22 日，谷歌量子 AI 团队宣布了一项里程碑式的算法突破，其“Willow”量子芯片成功运行了“量子回声”（Quantum Echoes）算法，首次在硬件上实现了可验证的量子优势。

结果显示，在执行特定任务时，该量子计算机的表现超越了目前最快的经典超级计算机，速度快了 1.3 万倍。这一进展能够计算分子结构，为量子计算在医药、材料科学等领域的真实世界应用铺平了道路。

此次突破建立在谷歌过去数年研究成果之上——2019 年，谷歌证明了量子计算机能解决顶尖超算耗时数千年才能完成的问题；2024 年末，新一代 Willow 量子芯片展示了如何显著抑制错误，解决了困扰科学家近 30 年的重大难题。

（来源：证券时报）

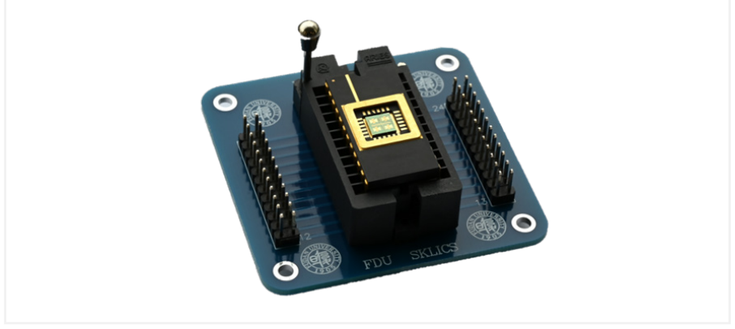


技术落地激活产业新生态

近期全球芯片领域创新成果密集涌现，彰显技术落地应用新突破。复旦大学研发全球首颗二维 -硅基混合架构闪存芯片，为下一代存储技术掌握主动权；清华大学“玉衡”芯片实现亚埃米级快照光谱成像，破解传统技术固有矛盾。产业端，德氪微电子发布全球首颗超高耐压毫米波隔离驱动芯片，已进入量产阶段；美国科学家推出光基芯片，使 AI任务能效提升十至百倍。这些创新成果覆盖存储、成像、驱动、AI计算等关键领域，为相关产业高质量发展注入强劲动能。

栏目主持 / 田　也

复旦大学科研团队研发全球首颗二维 - 硅基混合架构闪存芯片



封装后的二维 - 硅基混合架构闪存芯片（带 PCB 板）

10 月 9 日消息，复旦大学集成芯片与系统全国重点实验室、集成电路与微纳电子创新学院周鹏 - 刘春森团队率先研发出全球首颗二维 - 硅基混合架构芯片。这一突破攻克了新型二维信息器件工程化的关键难题，为推动信息技术迈入全新高速时代提供了强力支撑。北京时间 10 月 8 日深夜，《自然》期刊发表了上述研究成果。

周鹏 - 刘春森团队方面认为，这是中国集成电路领域的“源技术”，使中国在下一代存储核心技术领域掌握了主动权。展望二维 - 硅基混合架构闪存芯片的未来，该团队期待该技术颠覆传统存储器体系，让通用型存储器取代多级分层存储架构，为人工智能、大数据等前沿领域提供更高速、更低能耗的数据支撑，让二维闪存成为 AI 时代的标准存储方案。

存储器产业界代表认为，周鹏 - 刘春森团队研发的二维 - 硅基混合架构芯片具有天然的访问速度优势，可突破闪存本身速度、功耗、集成度的平衡，未来或可在 3D 应用层面带来更大的市场机会，下一步期待通过产学研协同合作，为市场带来变革。

（来源：中国新闻网）

Core Summary

Technology Implementation Ignites a New Industrial Ecosystem

Recently, a wave of breakthrough innovations has emerged across the global semiconductor industry, highlighting significant advances in real-world technology deployment. Fudan University has developed the world's first 2D–silicon hybrid architecture flash memory chip, positioning China at the forefront of next-generation storage technologies. Meanwhile, Tsinghua University's "Yuheng" chip achieves sub-ångström snapshot spectral imaging, resolving long-standing limitations of conventional imaging methods. On the industrial front, Dekew Microelectronics has unveiled the world's first ultra-high-voltage millimeter-wave isolated driver chip, which has already entered mass production. In the United States, scientists have introduced a photonic-based chip that boosts energy efficiency for AI workloads by 10 to 100 times. These cutting-edge achievements span critical domains—including memory, imaging, power driving, and AI computing—injecting powerful momentum into the high-quality development of related industries.



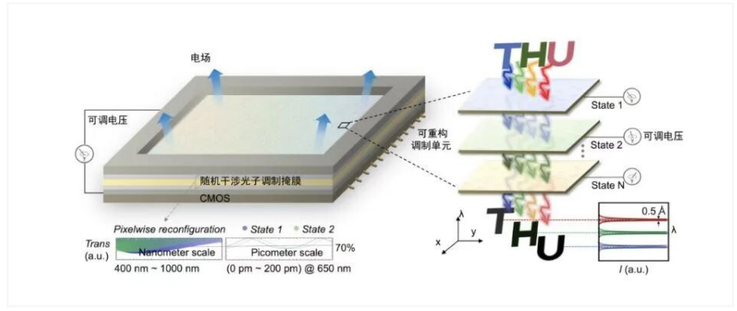
清华大学科研团队研制出全球首款亚埃米级快照光谱成像芯片

10 月 16 日，从清华大学获悉，该校电子工程系方璐教授团队在智能光子领域取得重大突破，成功研制出全球首款亚埃米级快照光谱成像芯片“玉衡”，标志着中国智能光子技术在高精度成像测量领域迈上新台阶，相关研究成果在线发表于学术期刊《自然》。

长期以来，传统光谱测量受限于分光采集与固化结构，光谱分辨率与成像通量间的固有矛盾始终是该领域未破解的科学难题。对此，科研团队基于智能光子原理，创新提出可重构计算光学成像架构，将传统物理分光限制转化为光子调制与计算重建过程。

通过挖掘随机干涉掩膜与铌酸锂材料的电光重构特性，团队实现高维光谱调制与高通量解调的协同计算，最终研制出“玉衡”芯片。“玉衡”芯片仅约 2 厘米 ×2 厘米 ×0.5 厘米，却可在 400—1000 纳米的宽光谱范围内，实现亚埃米级光谱分辨率、千万像素级空间分辨率的快照光谱成像，能在单次快照中同步获取全光谱与全空间信息，其快照光谱成像的分辨能力提升两个数量级，突破了光谱分辨率与成像通量无法兼得的长期瓶颈，为高分辨光谱成像开辟了新路径。

（来源：清华大学）



可重构计算光学成像架构

全球首颗超高耐压毫米波隔离驱动芯片发布

10 月 23 日，德氪微电子发布全球首颗超高耐压毫米波隔离驱动芯片——DKV56 系列。

据介绍，作为新一代高性能隔离式 IGBT、MOSFET、SiC 栅极驱动芯片，DKV56 系列集成德氪微 MillConnex® 毫米波无线隔离技术，在“高耐压、高 CMTI、高集成、低延时”四个关键指标实现突破，为 AI 数据中心、工业自动化、新能源与储能系统、新能源汽车、电力电子及高性能电机控制等领域带来更安全、更高效的电源系统解决方案。目前，芯片已进入量产阶段。

相较传统的光耦、电容或磁变压器隔离方案，DKV56 系列采用创新的毫米波隔离架构，在高速传输与高耐压之间实现了长期困扰业界的平衡。在连续三个月的高压可靠性测试中，DKV56 系列在

20kV 隔离耐压与 30kV 浪涌电压的设备测试极限的环境下保持稳定运行零失效，其共模瞬态抗扰度（CMTI）>200kV/μs，进一步验证了芯片在极端工况下的稳定性。DKV56 系列传播延时仅 38ns，并集成有源米勒钳位、软关断（STO）及短路钳位（ASC）等多项安全机制，显著提升系统响应速度与整体可靠性。

（来源：德氪微电子）



可重构计算光学成像架构

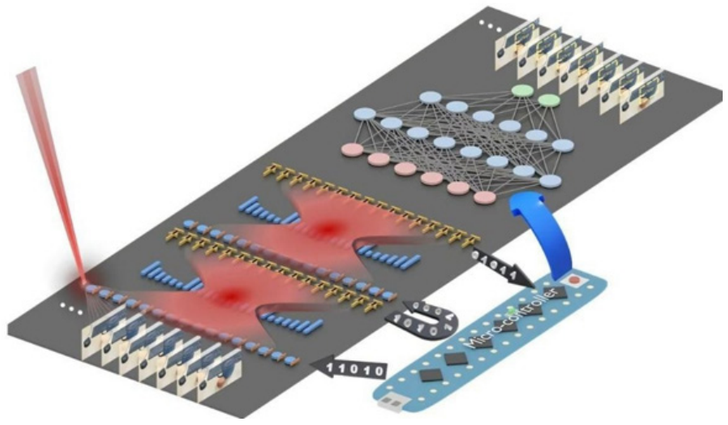
美国科学家研发出一款光基芯片 执行 AI 任务能效提升十至百倍

9 月 16 日消息，佛罗里达大学、佛罗里达半导体研究所、加州大学洛杉矶分校及乔治 · 华盛顿大学合作研制出一款光基芯片，可利用光与电协同工作，高效完成人工智能（AI）中功耗极高的图像识别等任务。新型芯片能效比超出执行同样任务的传统芯片 10 倍甚至百倍以上，有望显著缓解 AI 应用对电力的巨大需求，同时推动更高性能 AI 系统和模型的发展，相关研究成果发表于最新一期《先进光子学》杂志。

该芯片采用标准半导体工艺，在芯片表面蚀刻了两组微型菲涅耳透镜。在执行卷积运算时，机器学习数据首先被转换为激光信号，穿过透镜完成数学变换，最终结果再转回数字信号，以完成 AI 任务。

测试表明，该光基芯片对手写数字的分类准确率可达 98%，媲美传统电子芯片。研究团队称，这是首次将此类光学计算集成于芯片，并应用于 AI 神经网络。他们还证实，该芯片可通过不同颜色的激光同步处理多路数据流。

（来源：新华网）



新型硅光子芯片可将光编码数据实时转换为卷积运算结果

“芯光人物”约访

聚焦芯片领域领军者，深挖技术攻坚背后的决策智慧与行业洞见。《半导体视界》“芯光人物”栏目，以精炼笔触记录芯途微光，为行业决策者提供思想借鉴。

这里有顶尖专家的技术前瞻、企业掌舵人的战略布局、学术先锋的创新探索，每一段故事都藏着产业前行的密码。

关注我们，解锁更多半导体领域的深度访谈与先锋故事！

受访嘉宾涵盖：

- 头部半导体企业CEO/CTO，解析产业格局与战略抉择；
- 中外高校微电子领域博导，分享前沿技术研发突破；
- 细分赛道隐形冠军创始人，揭秘细分领域突围路径。

Semiconductor Horizons
Semiconductor Horizons
半导体视界

约访电话 Appointment Contact Number | 158-1121-5515

陈少民：驰骋职场的好“老爸”和思想者

陈少民认为，在发展中国半导体产业的过程中，我们应该多一点市场化的竞争及经营，应该享受其中的过程、看到这样做的意义，这样才能找到内在发展的驱动力。

文 / 慕容素娟



陈少民近影

【人物档案】

陈少民，美国宾州州立大学电机工程硕士，拥有超过 30 年的半导体从业经验，在美国硅谷工作和生活长达 27 年。担任过美国上市公司总经理、武汉新芯执行副总、长江存储执行副总、通富微执行副总；曾作为合伙人及总裁创办 4 家高科技企业，并分别在纳斯达克上市或被成功收购；曾任华美半导体协会会长、多个研发机构的顾问；曾任美国斯坦福大学、清华大学客座教授及美国圣何塞州立大学兼职教授；出版《战略高地——全球竞争与创新》《跨越两千年的影响力——学耶稣建立一流的团队》《老爸的叮咛》《如此说，才能造就人》等多本著作。

陈少民有一颗喜乐、热情的心，与他的专访，并没有限制在半导体领域。天南地北，无所不谈，从历史时空背景来分析中美贸易战，到半导体作为国之重器对一个国家的意义，再到家庭在一个人生命中的影响，以及人如何看待金钱、财富、健康等等。

古语云：良田万顷，日食一升；大厦千间，夜眠八尺。陈少民认为，拥有越简单的生活，便拥有越大的自由。为此，他穿着方面不追求名牌，生活上简单、质朴，上班有时开车，有时挤地铁，他都觉得十分自在。

陈少民诠释了多个出彩的人生角色：他是一名高管，也是一名企业家，还是一位善于思考的人。他将硅谷 27 年的管理经验出版成书《战略高地——全球竞争与创新》；他把从自己信仰中得来的智慧演变为书籍《跨越两千年的影响力——学耶稣建立一流的团队》；他还与更多的朋友和家长们分享如何用“心”说好话，推出书籍《如此说，才能造就人》。同时，他也是一位好“老爸”，提到孩子时，脸上会洋溢着幸福的笑容，他把对孩子的爱转化为生命的 7 个礼物送给孩子，并将其著成书《老爸的叮咛》。

在美国 27 年，曾担任上市公司高管并 4 次创业

小时候的陈少民并不是一个聪慧的孩子，四五岁时说话还口齿不清，只有父母能听懂他说的话。当时有一部名为《胡马度关山》的电影，父亲说要带他去看，前提是必须念得出片名，但是他怎么念都念不清楚。这几个字，最终说到别人能听懂，陈少民花了大约 2 年时间。

陈少民在美国宾州州立大学攻读电机工程硕士，毕业后进入公司当研发人员。他工作认真，但是由于语言及沟通问题，他的回报与付出往往不成正比。他下定决心要学好学精英文，并请家教一对一辅导，光是矫正发音就花了整整 4 年时间。之后，为了训练用英语公开演讲的能力，他向美国加州圣荷西大学申请执教，在圣荷西大学电机研究所教了 5 年“芯片设计”，之后又寻找机会在各个会议中做报告。最终，陈少民的英文演讲和沟通能力得以精进。

32 岁那年，陈少民先后作为合伙人参与了 4 家高科技企业初始公司，其中两家分别被上市半导体公司成功收购，1 家公司在纳斯达克上市，“非常幸运”，陈少民谦虚地说，“现在若要我再做一次初始公司，都不太敢做，那时是不知天高地厚。”

40 岁以后，陈少民主要是管理上市公司。2001 年初，他进入美国硅谷半导体芯片设计上市公司、硅谷前 150 大的 Pericom 担任总经理，一干就是 14 年。这 14 年间，陈少民需要到世界各地出差。他单在美联航的个人飞行里程数就达 400 多万公里，相当于绕地球飞了 100 多圈。“出差倒时差需要身体非常好，倒时差几乎把我身体的本都‘吃’掉了，所以我一直保持着简单、警醒的生活，吃得也很清淡。”陈少民说道。

陈少民在半导体行业有超过 30 年的经验，涉足领域也覆盖了设备、EDA、芯片设计、晶圆代工、IDM 到封测等半导体产业链。从负责工程到企业的全方位经营管理之外，陈少民在硅谷期间还曾担任多家公司 CEO 的教练，帮助制定产品策略、融资渠道及公司管理架构。他曾获 EDN94 年年度最佳产品奖，曾任最大的华人半导体协会 - 全球华美半导体协会会长 (CASPA，2001~2002)，并多年担任顾问；多次受邀任 IEEE 及 SEMI 的 SoC tutorial 讲员，主讲《IP Base SoC Design Methodology》；在 1999～2002 年，制定中国台湾 IT 及芯片及系统产品路线并参与《台湾 SoC 白皮书》的撰写；2002 年，被中国科技部提名为全球海外华人火炬奖得奖人；还曾担任多地的芯片及高科技顾问。

多年来，陈少民一直保持着赤子之心及质朴的生活观，对于自己所经历的一切人、事、物，他都很感恩：“其实我跟一般的人没什么两样，我的智力并不出众，只是非常幸运，遇到了一个好时机，把握住了好机遇。如果国家需要，我很愿意为国家做更多的贡献。”

回国投身半导体，呼吁“以史为镜，芯片是国之重器”

在中国集成电路产业追赶的道路上，存储器被当作排头兵。武汉新芯集成电路制造有限公司（后并入 YMTC- 长江存储）主要做半导体存储器，2018 年 4 月 26 日，习近平主席还特地到武汉新芯参观其生产线。2014 年底，52 岁的陈少民回到国内，担任武汉新芯执行副总暨首席商务官。

半导体芯片产业主要有三个环节：芯片设计、芯片制造生产、芯片封测。在这三个环节中，中国芯片封测与国际水平的差距最小。随后，陈少民又担任通富微电子股份有限公司执行副总、商务长暨总裁办主任。通富微电子是中国前三大封测企业，在全球封测企业排名领先。

之后，陈少民进入到高科技投资领域，在汉能投资集团担任董事总经理。汉能投资集团是一家专注于中国互联网经济、消费及医疗服务领域的投资银行，

Core Summary

Chen Shaomin's Social Contributions

With over 30 years of deep expertise in the semiconductor industry—including 27 years of professional experience in Silicon Valley and extensive multinational management background—Chen Shaomin has made significant contributions to China's tech sector since returning to the country. He has held senior executive roles at leading Chinese semiconductor companies such as Wuhan Xinxin Semiconductor Manufacturing (XMC) and Nantong Fujitsu Microelectronics Co.,Ltd,, playing a pivotal role in advancing China's semiconductor memory and advanced packaging/testing capabilities and strengthening the domestic supply chain. After transitioning into investment, he focused on high-tech financing, mergers, and acquisitions within the semiconductor sector, bringing professional insight and strategic capital to accelerate industry growth.Earlier in his career, Chen led the formulation of Taiwan's System-on-Chip (SoC) industrial roadmap and authored influential white papers on the subject. He also serves as a guest professor at multiple universities and as president of key industry associations, actively sharing his expertise in management and innovation. As the author of several books, including Strategic High Ground, Chen not only imparts wisdom on industrial competitiveness but also explores humanistic themes such as family education and the art of communication. He is a vocal advocate for cultivating semiconductor talent and promoting market-driven development in the sector. Through his professional legacy and thought leadership, Chen Shaomin continues to empower China's technological advancement and elevate public understanding of critical innovation issues.



业务涉及财务顾问、私募股权投资等，曾参与的并购交易有阿里巴巴收购饿了么、爱康国宾私有化、58 同城与赶集网合并、百度去哪儿与携程合并、优客工场与洪泰创新空间合并、万达集团收购快钱、阿里巴巴收购易传媒等。

“转到投资领域，我仍更关注半导体及高科技方面的投资、融资及并购，为中国半导体业发展提供更专业的服务。”陈少民说道。拥有半导体领域 30 多年的产业经验，以及在美国 27 年的文化浸润，对于中国半导体业的发展，陈少民也有自己的见解。

“近期的中美贸易战既是历史的偶然，也是必然。我们要读史为鉴，历史是会重复的，很多重大历史事件都有迹象。”陈少民阐述说，从历史轨迹来看，中美贸易战是美国从自身的国家战略出发进行的。

为什么中美贸易战重心是芯片？他指出，美国在全世界的影响力可谓是无远弗届，包括美元、军事力量等等，而全世界交易金额最大的两种货物是石油和芯片，这些都在用美元来交易。而新经济及现代国防的核心竞争力就是芯片，等中国半导体产业做大了，肯定有话语权，甚至可能会用人民币交易，这样就会撼动美元及高科技国防的地位。自然而然，美国要从芯片入手来遏制中国的发展。然而，中兴事件反映出中国在芯片上的缺失，但同时美国相关企业也受到巨大冲击。目前，全世界的半导体总值是 3630 亿美元，中国的芯片产出只有 100 亿美元左右。

对于半导体的重要性，陈少民从世界经济的发展史进行了纵横向对比：1860 年当全世界开始工业革命时，当年世界出现的纺织、采矿、电报、铁路等产业，跟现在手机、航天航空、飞机一样，都是新经济。工业革命的成果反映在工业实力上，而工业实力反映在国防和经济上。制造业是国家实力和军事的一个衬底，所以中国要发展“制造 2025”，美国一定会在制高点上压制中国。陈少民指出：“我个人认为，我们虽然是做高科技的，但对文化、政治等必须要有所了解。”

如今世界各国都在重点发展半导体。陈少民强调：“半导体是国之重器，是国力和生产力的象征，新经济的产值重心是要依托半导体来体现的。”

与此同时，发展半导体领军人才是关键。陈少民指出，君子务本，本立而道生，应该从一个有情怀的人文环境中去培养领军人才。“一个优秀企业家的培养过程，是要在一个有理想、有抱负的环境下诞生和孕育的。”他举例道，美国斯坦福、麻省理工、哈佛等大学培养了无数成功和优秀的企业家，这些企业家年轻时就是在一个良好的人文环境中成长的，他对人和社会是有关怀的，是有社会责任的，是站在哲学的高度再通过身体力行去实践的。面对残酷的竞争，他也愿意坚持，会持续有动力去做一项事业。

物有本末，事有终始；知所先后，则近道矣。“国家必须用政策来支持半导体发展，而且发展半导体产业是一个长期性的事业，要特别着力培养顶尖人才。”陈少民说道，“在发展中国半导体产业的过程中，我们应该多一点市场化的竞争及经营，应该享受其中的过程，看到这样做的意义，这样才能找到内在发展的驱动力。”

笔是剑，著书立言，余生还要“仗剑走天涯”

虽然是一名高管、一名企业家，但陈少民并没有将人生局限于职场。

在硅谷时，他曾担任斯坦福大学可持续发展和全球竞争力研究中心兼职教授，与学生分享硅谷高科技公司的商业模式、创新及管理经验。为此，2018 年他著书立言，推出《战略高地——全球竞争与创新》。此外，陈少民还写了不少人文和教育方面的书。2017 年出版《跨越两千年的影响力——学耶稣建立一流的团队》，2015 年出版《老爸的叮咛》，2012 年出版《如此说，才能造就人》。其中，《老爸的叮咛》和《如此说，才能造就人》成为当时台湾的畅销书。

职场工作如此繁忙，如何挤出时间写这些书？陈少民说，写书真的很难挤时间，在写《如此说，才能造就人》一书时，写完前半部分之后，正值公司在亚洲扩张，需要去各地出差、谈判；还恰逢新产品上线，常常加班到很晚；晚上还要和亚洲的团队视频会议，以至于写作一再延后。后来，读高中的儿子功课繁重，时常学习到深夜，陈少民就加入到深夜学习的阵营中。不久女儿也加入进来，以至于家中学习的风气更加浓厚，陈少民写书的进程也渐露曙光。

他还利用出差在飞机上写作，而且效率极高。陈少民开玩笑说道：“在飞机上可能是与上帝距离较近，灵感很多，文思泉涌，下笔如飞。”写累了，不管飞机客舱里有多吵，他蒙头就睡。

写书的过程着实不易，而就是这样一点一滴积累赶稿的岁月，陈少民却享受其中，十分有热情。“世上没有一模一样的人，每个人的一生都有自己的独特目的。当你找到自己的使命时，你就会非常有热情；有了热情，你所做的事就会变得很有趣，你就会全力以赴，不在乎有没有回报。否则，做事情很难持续，容易随波逐流，人会很容易焦虑的。”陈少民说出了他的热情来源。

职场的繁忙，使很多职场人士往往无法兼顾家庭或不得不牺牲家庭，而陈少民非常重视家庭关系。尤其当他的一位一起长大、无所不谈的挚友突然离世时，陈少民忽然悟出人生的无常，不由思考：“作为父亲，我能给孩子最好的礼物是什么：丰厚的家产、显赫的权势、优越的物质条件？我觉得都不是，最好的礼物应该是心灵的传承。”

于是，在《老爸的叮咛》中，陈少民送给孩子生命的 7 个礼物：在叩问人生终极意义中启示的信仰；在生活实践中的品格；在敬畏上帝中领悟的智慧；终身学习、敬业自律、奉献社会的工作观；取之有道、用之有度、施之有恩的金钱观；恒久忍耐、恩慈友爱中成长的友谊观、婚恋观、家庭观；寻找使命、承担责任、喜乐健康的人生观、自我观、价值观。

这本书也是陈少民挤时间写出来的，书中序言的开头这样写到：“亲爱的平平、薇薇，你们好吗？爸爸想念你们，想念你们的妈妈。此刻，爸爸正在某个旅馆的房里，刚预备完明天一连串密集的会议……”

对家庭和孩子的用心，换来的是非常和谐的家庭关系。当陈少民提到两个孩子时，他脸上洋溢着幸福的笑容。现在，儿子已参加工作，女儿即将大学毕业，但是孩子们生活、学习和工作中的烦恼会与他倾诉；人生规划和理想，也会与他分享和商量。提起孩子，陈少民欣慰地说道：“两个孩子与我和爱人就像朋友一样，我们家庭的纽带非常强。我们很感恩，有这样的关系一生就够了，足已。”

不仅对家人用心，陈少民还关注和关心更多的人。他目睹现代人的交流方式和交流环节越来越复杂，人与人之间的沟通也越来越困难。于是，他通过一百多个中外名人的故事，从西方的苏格拉底到东方的魏征，揭示沟通最大的智慧在于用“心”说好话，让人们相互间自信沟通、用心沟通。为此，《如此说，才能造就人》一书问世。

陈少民骨子里更像是一位思想者，他很喜欢思考，很在乎脑海中随时涌现的一个思想或想法。

陈少民说：“芯片在人类的历史轨迹中看起来非常渺小，而且受到时间、空间、应用的约束，但这些人文方面的书不会受时间、空间的影响。”

“人生有不同的季节，我要趁着血气未衰的时候，尽快把我所知道或想写的写下来。”在陈少民的眼中，今之侠者，笔是剑，他开玩笑说余生还要“仗剑走天涯”。

氮化物半导体深紫外 LED 技术现状及应用

全球范围内，多个研究机构和公司在深紫外 LED领域的各个环节取得了显著进展，通过不同的技术路线提升了器件性能。中国、日本、德国和美国等国家的研究团队在材料生长、器件结构设计和封装技术等方面均有突破，且在许多关键指标上已基本并跑。

刘乃鑫 [1] 郭亚楠 [1] 张 童 [2] 崔丹妮 [2] 闫建昌 [1*]

（[1] 中国科学院半导体研究所；[2] 山西中科潞安紫外光电科技有限公司）

一、引言

AlGaN 基深紫外发光二极管（LED）作为第三代半导体技术的重要分支，凭借无汞环保、开关速度快、波长精准可控和易于集成等优势，已在公共卫生、医疗健康、工业催化、紫外通信等领域实现突破性应用。在公共卫生领域，其可有效替代传统汞灯，广泛应用于空气、水体及物体表面消毒；在工业领域，深紫外 LED 可用于食品包装杀菌、工业废水处理、PCB 涂层快速固化以及非视距通信系统；在安全通信领域，具有“日盲”特性的 UVC 波段因大气吸收强、背景干扰低，展现出了显著优势；在生化检测领域，深紫外 LED 结合荧光激发技术，可实现对水质污染、有机污染物及生物气溶胶的高灵敏度识别；在海洋监测领域，250–280nm 波段 LED 被用于追踪有色溶解有机物（CDOM）浓度变化，为水生态系统评估提供关键数据支持；在医疗健康领域，基于深紫外光源的光疗设备在治疗银屑病、白癜风和骨质疏松症等方面表现出较传统光源更高的安全性与靶向性。

目前深紫外 LED 商业化产品的波长覆盖 227–280nm，光功率可达 60mW（100mA 驱动电流），具备高稳定性和窄谱宽特性。采用板级封装技术的集成模组可实现多芯片高密度集成，输出辐照强度超过 100 mW/cm^2，具有良好的工程适配性。随着《水俣公约》的实施及疫情防控需求的推动，深紫外 LED 产业进入了高速增长阶段：2023 年中国国内产值达 13 亿元，芯片产量达 1.2 亿颗，灯珠出货量达 5000 万颗；2024 年产值增至 17 亿元，芯片产量攀升至 1.6 亿颗，灯珠达 7800 万颗。

二、国际技术现状

深紫外 LED 的制造流程主要包括外延生长、芯片制造和封装三大环节。

(1) 外延阶段：采用高温金属有机化学气相沉积（MOCVD）设备进行高质量 AlGaN 基外延层生长。设备性能和工艺参数直接决定器件结构和材料缺陷密度，是影响器件效率的关键环节。

(2) 芯片制造阶段：主要涉及光刻、刻蚀和金属沉积等工艺。光刻用于实现微米级图形转移；感应耦合等离子体蚀刻（ICP）结合干法刻蚀工艺，可精确构建发光台面结构；金属沉积用于正、负电极的制备。

(3) 封装阶段：采用共晶焊技术将芯片牢固连接至基板，确保热阻降低与长

Core Summary

Globally, numerous research institutions and companies have made significant progress across various aspects of deep-ultraviolet (DUV) LED technology, enhancing device performance through diverse technical approaches. Research teams from China, Japan, Germany, the United States, and other countries have achieved breakthroughs in material growth, device structure design, and packaging technologies, with many key performance indicators now reaching comparable levels internationally.

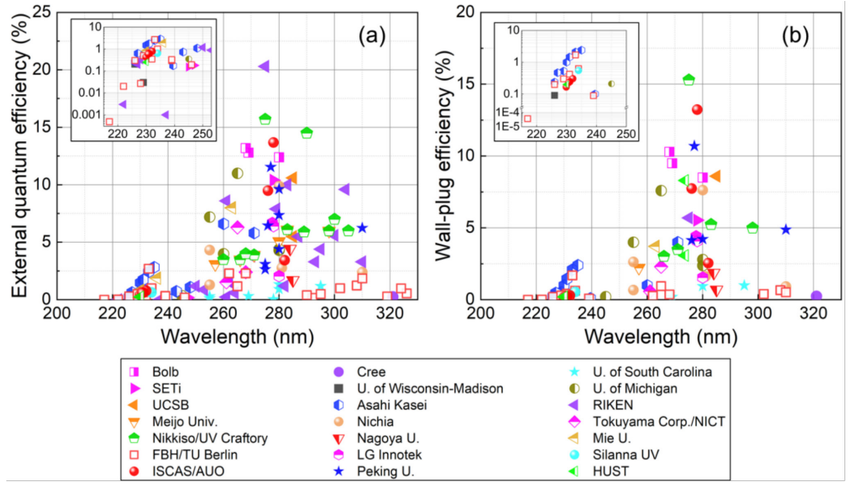


图 1. 国际上公开报道的深紫外 LED 的峰值：(a) 外量子效率；(b) 电光转换效率

Fig. 1. The reported (a) external quantum efficiency (EQE) and (b) wall-plug efficiency (WPE) of DUV LEDs.

期稳定性；引线键合完成电气互联；灌封工艺通过填充透明封装材料，提升光输出效率并增强可靠性。

全球范围内，多个研究机构和公司在深紫外 LED 领域的各个环节取得了显著进展，通过不同的技术路线提升了器件性能。中国、日本、德国和美国等国家的研究团队在材料生长、器件结构设计和封装技术等方面均有突破，且在许多关键指标上已基本并跑。

图 1 所示为国内外报道的深紫外 LED 的峰值外量子效率（External quantum efficiency, EQE）和电光转换效率（Wall-plug efficiency, WPE）[1-7]，远低于可见光 LED；且随着波长向更短的深紫外区域发展，效率下降更为显著[8-10]。深紫外 LED 效率低的主要原因可以归结为材料生长、载流子注入和光提取效率等方面的挑战。首先，高 Al 组分 AlGaN 材料的生长难度大，位错密度和点缺陷浓度高。其次，p 型 AlGaN 掺杂效率极低，由于 Mg 受主的激活能随 Al 组分增加而显著升高，空穴浓度低，电阻率高[11]；载流子注入浓度不对称，有源区电子过剩并易泄漏到 p 侧，造成空穴损失和非辐射复合[12]。再者，低的光提取效率（LEE）是限制深紫外 LED 发光效率的核心瓶颈之一。AlGaN 与衬底、空气之间的高折射率差导致大部分光线在内部全反射[13]；高 Al 组分 AlGaN 材料的发光模式中 TM 偏振光占据较大比例，而 TM 偏振光主要平行于生长表面传播，全反射更严重[10]；用于欧姆接触的 p 型 GaN 接触层也会强烈吸收 DUV 光[14]。

日本在深紫外 LED 领域代表性的研究团队包括 Nikkiso Giken 公司的 Matsukura 团队和 Nichia Corporation 公司的 Ichikawa 团队。Matsukura 团队通过优化 p 型层光学厚度显著提升了深紫外 LED 的光输出性能[15]。该团队通过精确计算，设计并比较了厚 p-GaN 与薄 p-GaN 两种结构，其中薄 p-GaN 结构引入了高 Al 组分的 p-AlGaN 层。结果表明，当 p 型层总光学厚度约为发光波长的 0.66 倍时，器件发光性能达到最优。在此条件下，薄 p-GaN 结构的光输出功率较厚 p-GaN 结构提升约 2.2 倍，在 10 mA 电流下，峰值 EQE 和 WPE 分别达到 15.7% 和 15.3%（目前报道最高水平）。源于薄 p-GaN 层对紫外光吸收的抑制，以及 p 型反射电极所形成的干涉增强效应，发光性能得以大大提升。Ichikawa 团队则聚焦于提升 LEE，提出采用直接键合技术解决传统深紫外 LED 因不透明 p 型接触层及封装树脂强吸收导致的光损耗问题[7]。该团队将无机半球形蓝宝石透镜直接键合至 LED 芯片表面，采用原子扩散键合（ADB）和表面活化键合（SAB）两种工艺实现高质量界面连接，制备了 255 nm 与 280 nm 波长的深紫外 LED。键合透镜后的器件在输出功率与 EQE 方面均显著改善：在 350 mA 电流下，255 nm LED 输出功率提升 2.8 倍，达 73.6 mW；280 nm LED 提升 2.3 倍，达 153 mW。该方法为深紫外 LED 的高效封装与光提取提供了技术方向。

德国在本领域则以 Technische

Universität Berlin 和 FBH 研究所的 Michael Kneissl 团队为代表。Michael Kneissl 团队在发光波长短于 250nm 的远紫外 LED（far-UVC）领域研究领先。他们系统研究了量子阱（QW）数量对远紫外 LED 光输出性能及退化行为的影响[8]，发现在 233 nm 波长器件中存在一个最优 QW 数量范围（6–15 个），在此区间内，光功率输出与 L70 寿命均达到最佳水平。其中，含 15 个 QW 的 LED 在 200 mA 驱动电流下实现了 5 mW 的光输出功率和 0.47% 的峰值 EQE，L70 寿命为 9–13 小时。该团队的模拟分析揭示了其机制，增加 QW 数量可降低单个量子阱中的载流子密度，抑制空穴泄漏与非辐射复合，从而改善器件可靠性。然而，过高的 QW 数量可能引发光子再吸收效应，反而削弱光提取效率。该团队的研究指出，精准调控 QW 数量是协同提升 far- 深紫外 LED 光效与工作寿命的关键策略。

美国的代表性团队是 Bolb 公司的 Jianping Zhang 团队和 University of South Carolina 的 Asif Khan 团队。Jianping Zhang 团队报道的峰值波长为 268 nm 的 UVC LED[2]，其峰值 EQE 和峰值 WPE 分别达到 13.2% 和 10.3%，在 350 mA 注入电流下实现 199 mW 的光输出功率，性能位居当时国际领先水平。为了测算电注入器件的内量子效率（IQE）、LEE 等参数，该团队基于载流子复合 ABC 模型的温控拟合方法，建立了能同时描述热激发、载流子扩散及复合竞争的物理框架 [16]。Asif Khan 团队从热管理角度出发，通过将像素尺寸缩小至 5-15 μm，并采用互连散热设计 [17]，在 281 nm 下实现了裸芯 361 W/cm² 的高亮度输出。微像素阵列因其较大的比表面积，显著增强了侧向散热能力并改善了电流分布均匀性，有效降低了串联电阻与结温上升，大幅缓解了效率下降的问题。

中国国内研究团队以中国科学院半导体研究所（简称“半导体所”）的李晋闽研究员、闫建昌研究员团队和北京大学的沈波教授团队等为代表。李晋闽研究员、闫建昌研究员团队联合山西中科潞安紫外光电科技有限公司（简称“中科潞安”）最近提出一种芯片级液体封装技术 [4]，显著提升了深紫外 LED 的 LEE。通过实验验证与蒙特卡洛射线追踪模拟分析，研究证实自组装形成的液体杯体结构可有效扩大光子逸出锥角、增加额外出光区域，并利用倾斜侧壁的多重散射效应促进光子逃逸。采用该技术封装的深紫外 LED 在 350 mA 电流下的 WPE 达到 10.7%，较传统深紫外 LED 提升 64.9%；5 mA 注入电流下的峰值 WPE 高达 13.24%。这种液体杯状结构还能显著增强前向光输出，特别适于高定向的辐照应用场景。沈波教授团队提出并验证了一种量子结构优化策略：调整有源区设计，使其以量子阱层而非量子垒层终止，从而将电子积累效应引导至最后一个量子阱内 [5]。该设计使空穴更易注入至发光区域参与辐射复合，有效提升了载流子复合效率。他们研制的 277 nm 深紫外 LED 光输出功率达到 51.7 mW@ 100 mA，峰值 WPE 达 9.98%。

三、市场应用现状

在技术突破的坚实基础上，深紫外 LED 正以前所未有的速度从实验室走向广阔的市场，其应用领域不断拓展，展现出巨大的社会价值与商业潜力。

在公共卫生领域，深紫外 LED 凭借其高效、无毒、环保、可瞬时启停的杀菌特性 [18, 19]，正逐步取代传统汞灯，成为空气、水体及物体表面消毒的主流技术方案。其应用已从后疫情时代的应急需求转向常态化公共卫生体系建设，具体体现在三个方面 [20]：在空气消毒方面，波长在 260-280nm 的深紫外 LED 广泛集成于楼宇中央空调通风系统、室内空气净化器及公共交通车厢内，实现对流动空气的动态持续杀菌。这类应用不仅



要求 LED 单元具备足够的输出功率以应对快速流动的气流，更关键的是需对光路结构与屏蔽装置进行严格设计，确保紫外线不会泄露至人员活动区域，从而实现“人机共存”的安全消毒。在物体表面消杀方面，深紫外 LED 被应用于电梯按钮、自动扶梯扶手、智能马桶等高频接触表面的即时消毒，该类场景追求在 265-280nm 最佳杀菌波段下实现较高的表面辐照度，以有效阻断接触式传播链。其技术难点在于如何确保不规则表面接收无死角的照射剂量，并保障 LED 芯片在持续工作条件下的散热性能与使用寿命。在水体净化方面，深紫外 LED 多选用 265-275nm 波段，通过破坏水中微生物的 DNA/RNA 实现灭菌，相比化学消毒可避免有害副产物的生成，可高效用于公共场所的直饮水终端、二次供水系统及循环水池的净化，确保供水安全。该类应用要求 LED 具备良好的防水封装和一定的输出功率（通常在数十毫瓦以上），以适应不同水质和流速的处理需求。但目前深紫外 LED 的电光转换效率仍较低，制约了其在大型水处理厂中替代传统紫外汞灯的经济可行性。此外，各类便携式深紫外 LED 消毒设备（如消毒盒、杀菌笔）也为个人防护提供了极大便利，共同构建起高效、安全且可持续的立体化消毒屏障。

在工业领域，深紫外 LED 凭借其可靠性、长寿命及环保特性，正从多个维度重塑传统工艺流程。在食品与饮料行业，深紫外 LED 系统可被集成于灌装线、包装膜或封闭容器内部，对产品表面及包装材料进行在线、非热式杀菌。通常选用 265–275nm 波段，并依据产线速度与辐照距离配置相应功率（数瓦至数百瓦），从而在确保微生物灭活效果的同时避免物料受热变质，有效延长货架期并保障食品安全 [21]。目前该类应用面临的主要挑战在于，如何在控制成本的条件下实现大照射范围内的均匀辐照，并维持设备在高温、高湿工业环境下的长期运行可靠性。在工业水处理方面，它可用于对市政污水、食品饮料工业用水、游泳池等进行高效消毒 [22]，一般采用 260–275nm 波段，并搭配瓦级高功率模块以适应不同水质条件与紫外穿透深度需求。其瞬时启停的特性便于实现按需杀菌，且无需担心汞泄露带来的二次污染风险。尽管 LED 光源易于模块化集成和智能控制，但其大规模应用仍受限于当前单位功率的光电转换效率较低，处理大流量水体时，在能耗与总拥有成本上相较于传统紫外汞灯尚未形成绝对优势。在电子与材料制造中，深紫外光（尤以 250-280nm 波段为主）被用于精密清洗（如去除光刻胶）、表面改性及光固化等工艺。这类应用对波长纯度和功率稳定性要求极高，波长必须与光敏材料的吸收峰精确匹配。当前的主要障碍是满足此要求的深紫外 LED 光源成本极高，且输出功率和长期工作下的波长漂移控制仍是需要持续攻克的技术瓶颈。

在安全通信领域，深紫外 LED 利用其独特的“日盲”特性（波长在 200-280nm 的紫外光被地球臭氧层强烈吸收，太阳光中此波段背景辐射近乎为零），可实现高保密性的“日盲紫外光通信”[23]。这种通信方式不易被探测和干扰，且能够实现高保密性的非视距传输 [24]，即在有障碍物遮挡或复杂地形环境下，通过大气散射实现通信，特别适用于军事指挥、舰船编队、应急救灾等需要高保密和抗干扰能力的特殊场景。在技术实现上，通信系统的功率与波长选择随传输距离而变化。在近距离室内保密通信或战术应用中，波长 265-275 nm、毫瓦量级功率的深紫外 LED 即可满足需求，重点在于设备小型化与集中化。而在数公里级的远距离通信中，则需采用瓦级以上的高功率 LED，并优选靠近日盲波段中心波长（260-270nm）以进一步增强抗背景光干扰能力。尽管如此，该技术的规模化应用仍面临多重挑战。在器件层面，存在光提取效率低、调制带宽受限以及器件寿命较短等问题；在系统层面，则需应对大气信道衰减、背景噪声抑制、高性能日盲滤光等关键技术难题。目前，随着紫外半导体材料与器件工艺的持续发展，深紫外 LED 安全通信正逐步从实验研究阶段走向特定场景下的示范应用。

在生化检测领域，深紫外 LED 作为紧凑型激发光源，正推动现场快速检测设备的革新。基于紫外荧光光谱技术，当特定波长的深紫外光（通常位于 265-280nm）照射到待测物（如蛋白质、细菌、毒素、DNA）时，会激发出特征荧光，通过分析荧光信号即可实现高灵敏度、高特异性的定性或定量分析。在食品安全方面，可快速检测果蔬表面的农药残留 [25]、谷物中的黄曲霉素。这通常需选用特定波长（如 280nm 常用于激发蛋白质荧光）与适中功率的 LED，以在检测水平与设备功耗之间取得平衡。在水质监测方面，紫外监测设备可评估水质污染（如重金属离子 [26]、烃类污染），并实现对水体中病原体（如大肠杆菌 [27]、军团菌 [28]）的现场筛查，有效弥补了传统实验室分析的滞后性。此外，由于深紫外 LED 能有效激发有机污染物及生物气溶胶的固有荧光，这使得开发用于大气有机污染物监测，甚至战场或公共安全领域生化战剂实时预警的便携式、低成本检测仪成为可能。然而，不同污染物对激发波长响应各异，要求 LED 光源具备波长可调或精准匹配能力。同时，传感器的微型化、抗环境干扰能力、高功率 LED 的热管理与光谱稳定性等问题，仍是当前技术推广的主要障碍。

在海洋监测领域，深紫外 LED 为原位、实时海洋环境监测提供了新工具。

传统上，对海水中的硝酸盐、亚硝酸盐、COD 等关键化学参数的监测需要采集样本后送回实验室，过程繁琐且滞后。利用深紫外 LED，特别是 250-280 nm 波段的发光特性，可制成高灵敏度的小型化传感器。该波段对有色溶解有机物（CDOM）[29] 的荧光激发效应尤为显著，能够通过检测其荧光强度反演 CDOM 浓度变化，进而有效追踪陆源有机物输入、水体富营养化进程 [30] 及碳循环通量，为海洋生态系统健康评估提供关键数据支撑 [31]。此外，该类传感器还可用于探测浮游植物分布、石油烃类污染物等，其低功耗、小型化与抗干扰特性，使其非常适合搭载于水下机器人、剖面浮标或岸基 / 船基监测平台，实现长期、连续、实时的海洋数据采集，为海洋科学研究、环境保护和渔业资源管理提供宝贵的数据支持。在实际应用中，传感器需根据监测目标优选激发波长（如 260nm 左右适用于 CDOM 检测，275nm 左右适用于硝酸盐紫外吸收法检测），并具备数十毫瓦量级的输出功率，以保证在部分浑浊水体中仍能获取有效信号，同时维持较低运行功耗以适应水下平台的能源限制。然而，海洋环境的高腐蚀性、温度波动、光学窗口污染以及深水高压条件下 UVC-LED 的可靠性问题，仍是制约该类传感器大规模部署的关键挑战。

在医疗健康领域，紫外 LED 的应用已从设备表面消毒延伸至精准治疗与疾病预防层面。在光疗应用中，基于特定波长的紫外 LED 光疗设备展现出显著优势，其中波长 311nm 左右的窄谱中波紫外线已成为治疗银屑病 [32]（牛皮癣）、白癜风 [33] 等皮肤疾病的有效手段。相较于传统宽谱紫外光源，窄谱紫外 LED 光谱纯净、输出稳定，可实现更高的治疗靶向性，并能精确控制辐照剂量，从而在保障疗效的同时大幅降低皮肤灼伤与癌变风险，为开发安全、便捷的家用型治疗设备奠定了基础。除皮肤疾病外，该技术也在探索用于骨质疏松症的辅助治疗，其原理是通过波长在 290-315nm 的紫外线高效促进人体合成维生素 D[34, 35]，以调节钙磷代谢，增强骨密度。然而，该应用目前仍处于研究阶段，关键挑战在于确定适用于不同皮肤类型与年龄人群的安全辐照剂量方案，并需通过大规模临床试验验证其长期有效性与安全性。在临床感染控制方面，深紫外 LED 还可集成于内窥镜等医疗设备末端 [36]，实现手术过程中的即时杀菌，全方位守护患者与医护人员的健康。

深紫外 LED 正以其独特的技术优势，从公共卫生到工业制造，从安全通信到精密检测，从海洋监测到医疗健康，全方位、多维度地融入经济社会发展的关键环节。它不仅为传统行业带来了颠覆性的技术革新，更催生出全新的应用场景与市场空间，展现出驱动产业升级、守护公众健康、保障社会安全的巨大综合价值。随着技术的持续成熟与成本的进一步优化，深紫外 LED 的应用边界还将不断拓宽，其未来市场潜力无限，必将为构建更安全、更健康、更高效的社会贡献更为深远的力量。

四、总结

中国在深紫外 LED 领域的研究整体上与美国、日本、德国等科技强国处于并跑状态，并在部分关键技术方向实现领跑。中国研究团队在 AlGaN 材料外延生长、器件结构设计等方面展现出显著创新能力，同时在高可靠性封装技术及水 / 空气消毒等应用场景拓展方面取得实质性突破。例如，中国科学院半导体所联合中科潞安公司实现的 13.23% 的 WPE 已达到国际先进水平，标志着关键性能指标的全面对标。上述成果表明，依托持续的研发投入和系统性技术创新，中国已在深紫外 LED 领域构建起覆盖材料、器件到封装的完整技术链，形成了具有国际竞争力的研发体系，并在多个核心维度与美、日、德等传统领先国家实现并跑甚至局部领跑。

未来在技术上，需要继续攻克关键技术难题，提高深紫外 LED 的综合性能；在市场方面，积极拓展应用领域，加强市场推广，提高国产深紫外 LED 产品的市场认可度和占有率；在标准制定上，加快建立完善的行业标准体系，规范市场秩序，促进产业健康发展。展望未来，随着智能化控制、标准化模组设计和系统集成能力的提升，深紫外 LED 有望进一步渗透至更多专业化与高附加值场景，成为推动公共卫生体系建设与工业绿色升级的核心利器。

致谢

感谢中国国家重点研发计划（2022YFB3604800）、国家自然科学基金（62274163, 62135013, 62234001, 62250071）、北京市科技新星计划（20230484466）和中国科学院青年创新促进会（2022000028, 2023123）等的资助支持。

参考文献

[1]Takano T, Mino T, Sakai J, et al., Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency[J], Appl Phys Express. 2017, 10(3): 031002.

[2]Zhang J P, Zhou L, Gao Y, et al., Performance and analysis of an ultraviolet C-band light emitting diode with an emission wavelength of 268 nm[J], Semicond Sci Tech. 2022, 37(7): 07LT01.

[3]Matsukura Y, Inazu T, Pernot C, et al., Improving light output power of AlGaN-based deep-ultraviolet light-emitting diodes by optimizing the optical thickness of p-layers[J], Appl Phys Express. 2021, 14(8): 084004.

[4]Hao L, Wang L, Guo Y, et al., Enhancing the Performance for High-Power AlGaN-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes Using Self-Assembled Chip-Scale Inclined Sidewall[J], IEEE Electr Device L. 2025, 46(3): 377-380.

[5]Ji C, Wang J, Lang J, et al., Unveiling and eliminating the parasitic hole loss in AlGaN-based deep-ultraviolet light-emitting diodes[J], Appl Phys Lett. 2025, 126(21): 212107.

[6]Pandey A, Shin W J, Gim J, et al., High-efficiency AlGaN/GaN/AlGaN tunnel junction ultraviolet light-emitting diodes[J], Photonics Res. 2020, 8(3): 331-337.

[7]Ichikawa M, Fujioka A, Kosugi T, et al., High-output-power deep ultraviolet light-emitting diode assembly using direct bonding[J], Appl Phys Express. 2016, 9(7): 072101.

[8]Schilling M, Ruschel J, Cho H K, et al., Effect of quantum well number on the efficiency and degradation of AlGaN-based far-UVC LEDs emitting at 233 nm and 226 nm[J], Semiconductor Science and Technology. 2025, 40(4).

[9]Kobayashi H, Sato K, Okuaki Y, et al., Enhanced Wall‐Plug Efficiency over 2.4% and Wavelength Dependence of Electrical Properties at Far UV‐C Light‐Emitting Diodes on Single‐Crystal AlN Substrate[J], physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters. 2024, 18(11).

[10]Nicholls J, Anderson L, Lee W, et al., High performance and high yield sub-240 nm AlN:GaN short period superlattice LEDs grown by MBE on 6 in. sapphire substrates[J], Applied Physics Letters. 2023, 123(5).

[11]Liu D, Cho S J, Park J, et al., 226 nm AlGaN/AlN UV LEDs using p-type Si for hole injection and UV reflection[J], Applied Physics Letters. 2018, 113(1).

[12]Ji C, Wang J, Lang J, et al., Unveiling and eliminating the parasitic hole loss in AlGaN-based deep-ultraviolet light-emitting diodes[J], Applied Physics Letters. 2025, 126(21).

[13]Hao L, Wang L, Guo Y, et al., Enhancing the Performance for High-Power AlGaN-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes Using Self-Assembled Chip-Scale Inclined Sidewall[J], IEEE Electron Device Letters. 2025, 46(3): 377-380.

[14]Ichikawa M, Fujioka A, Kosugi T, et al., High-output-power deep ultraviolet light-emitting diode assembly using direct bonding[J], Applied Physics Express. 2016, 9(7).

[15]Wang L, Wu Y, Chu C, et al., Size-dependent photon scattering effects in AlGaN-based deep ultraviolet LEDs with varied length-to-width ratios[J], Opt Lett. 2025, 50(13).

[16]Zhang J, Zhou L, Gao Y, et al., Radiative recombination of a high internal-quantum-efficiency 268 nm ultraviolet C-band light emitting diode[J],



中科潞安生产区的工作人员正在检测芯片。李路 梁艳锋摄

Applied Physics Letters. 2023, 122(10).

[17]Floyd R, Gaevski M, Alam M D, et al., An opto-thermal study of high brightness 280 nm emission AlGaN micropixel light-emitting diode arrays[J], Applied Physics Express. 2020, 14(1).

[18]Takagi T, Nishikawa J, Yanagihara M, et al., Microbicidal effect of deep ultraviolet light-emitting diode irradiation[J], Lasers in Medical Science. 2021, 36(4): 927-931.

[19]Muramoto Y, Kimura M, Kondo A, Verification of inactivation effect of deep-ultraviolet LEDs on bacteria and viruses, and consideration of effective irradiation methods[J], Japanese Journal of Applied Physics. 2021, 60(9).

[20]Bhattarai T, Ebong A, Raja M, A Review of Light-Emitting Diodes and Their Applications[J], Photonics. 2024, 11(6).

[21]Koutchma T, Popović V, Ros - Polski V, et al., Effects of Ultraviolet Light and High-Pressure Processing on Quality and Health-Related Constituents of Fresh Juice Products[J], Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2016, 15(5): 844-867.

[22]Matsumoto T, Tatsuno I, Hasegawa T, Instantaneous Water Purification by Deep Ultraviolet Light in Water Waveguide: Escherichia Coli Bacteria Disinfection[J], Water. 2019, 11(5).

[23]Mo X, Liang Y, Wang L, et al., Solar-blind deep ultraviolet light communication network[J], Optics Express. 2025, 33(17): 36280-36292.

[24]Arya S, Chung Y H, Non-Line-of-Sight Ultraviolet Communication With Receiver Diversity in Atmospheric Turbulence[J], Ieee Photonics Technology Letters. 2018, 30(10): 895-898.

[25]Chen H, Shi Q, Fu H, et al., Rapid detection of five pesticide residues using complexes of gold nanoparticle and porphyrin combined with ultraviolet visible spectrum[J], Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020, 100(12): 4464-4473.

[26]Qiu J, Zeng D, Lin Y, et al., Carbon-polymer dot-based UV absorption and fluorescence performances for heavy metal ion detection[J], Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2023, 285(

[27]Deshmukh R, Bhand S, Roy U, A novel method for rapid and sensitive detection of viable

cells using UV-induced PMA-coupled quantitative PCR[J], Brazilian Journal of Microbiology. 2020, 51(2): 773-778.

[28]Badoux P, Atsma A, Harmelen-Vrins E v, et al., UV-light fluorescence as a confirmation method for presumptive Legionella colonies isolated from water samples[J], Letters in Applied Microbiology. 2024, 77(10).

[29]Harringmeyer J P, Kaiser K, Thompson D R, et al., Detection and Sourcing of CDOM in Urban Coastal Waters With UV-Visible Imaging Spectroscopy[J], Frontiers in Environmental Science. 2021, 9(

[30]Bai R, He X, Bai Y, et al., Characteristics of water leaving reflectance at ultraviolet wavelengths: radiative transfer simulations[J], Optics Express. 2020, 28(20): 29714-29729.

[31]Tedetti M, Joffre P, Goutx M, Development of a field-portable fluorometer based on deep ultraviolet LEDs for the detection of phenanthrene- and tryptophan-like compounds in natural waters[J], Sensors and Actuators B-Chemical. 2013, 182(416-423.

[32]Gu X, Shen M, Zhao S, et al., Combination of targeted UVB phototherapy and calcipotriene versus targeted UVB alone in psoriasis: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J], Journal of Dermatological Treatment. 2022, 33(1): 100-104.

[33]Mendes R B, Alpalhão M, Filipe P, UVB phototherapy in the treatment of vitiligo: State of the art and clinical perspectives[J], Photodermatology Photoimmunology & Photomedicine. 2022, 38(3): 215-223.

[34]Webb A R, Alghamdi R, Kift R, et al., 100 YEARS OF VITAMIN D Dose-response for change in 25-hydroxyvitamin D after UV exposure: outcome of a systematic review[J], Endocrine Connections. 2021, 10(10): R248-R266.

[35]Lin M-Y, Lim L M, Tsai S-P, et al., Low dose ultraviolet B irradiation at 308 nm with light-emitting diode device effectively increases serum levels of 25(OH)D[J], Scientific Reports. 2021, 11(1).

[36]Halmans Y, Wellenstein D J, Romijn M, et al., A multicenter study comparing the bacterial reduction on flexible endoscopes without a working channel between UV-C light disinfection versus standard endoscope Washer Disinfection: a randomized controlled trial[J], Antimicrobial Resistance and Infection Control. 2024, 13(1).

基于低维碳化钒 MXene 的感存算一体化人工突触及其神经形态应用

In-memory computing sensor synapse based on low-dimensional V_2CT_x MXene and its bio-inspired neuromorphic application

沈棕杰[1] 徐 非[2] 陆琪峰[1] 赵 春*,[3] 陈 伟*,[1]

([1]西交利物浦大学芯片学院；[2]中国国家电网上海市电力公司；[3]西交利物浦大学智能工程学院)

摘要：浮栅（floating gate, Fg）结构感存算一体化人工突触（in-memory computing sensor synapse, IMCS synapse）凭借其电荷俘获层优异的可调控性，展现出卓越的非易失存储特性，近年来受到广泛关注。该类突触晶体管可有效提升人工神经形态系统的运算效率，并增强其仿生行为模拟能力。新兴二维材料 MXene 因具备高光敏性、优异电化学性能与良好亲水性，被广泛认为是构建 IMCS 人工突触浮栅层的理想候选材料。本研究中首次采用溶液旋涂法制备碳化钒（V_2CT_x）MXene 浮栅层薄膜，退火过程中浮栅层薄膜表明自发形成氧化钒（VO_X）隧穿层薄膜，随后以相同方法沉积氧化镓（GaO_X）沟道层薄膜，并通过溅射法沉积电极薄膜，最终成功制备浮栅型晶体管器件。器件在电学与光学刺激下均表现出稳定的突触响应与可靠的仿生记忆行为，成功实现了长时程类脑学习功能的模拟。进一步地，其基于短波紫外光刺激所诱发的突触特性被应用于神经网络中，实现了对手写数字数据集的高精度识别，识别准确率超过 95%。

关键词：感存算一体化；非易失存储；低维浮栅层；人工突触

1. 引言

随着物联网对存储容量和运算速度要求的不断提升，基于摩尔定律与传统 CMOS 技术的现有计算硬件系统日益面临高能耗、存算分离以及生物相容性不足等挑战。受生物神经元结构启发，新兴的光调控感存算一体化（in-memory computing sensor, IMCS）人工突触展现出显著的仿生优势，包括高度并行计算能力、良好的材料兼容性、优异的生物环境感知特性、长时非易失性存储能力以及环境友好性等特性[1-5]。如图 1a 所示，光学 IMCS 人工突触可视为神经形态工程与经典光电子技术深度融合的典型产物。与基于突触的生物视觉系统相类似，具备感存算一体化特性的光电人工突触及其光神经形态计算（optical neuromorphic computing, ONC）架构在人工智能领域显示出巨大的发展潜力，能够高效推进信息感知与数据处理能力，从而促进万物互联的实现。高性能 ONC 系统在生物医学、国防科技及微电子工程等领域具有广泛的应用前景[6, 7]。此外，

Core Summary

Artificial in-memory computing sensor (IMCS) synapse with floating gate structure has received widespread interest due to the excellent non-volatility

依托低维纳米材料、钙钛矿和有机材料等先进材料体系，光学 IMCS 人工突触有望进一步降低功耗与能量损耗，顺应“碳中和（Carbon Neutrality）”战略目标。低功耗意味着更少的碳排放，甚至可推动碳中和进程中“相对零排放”目标的实现 [8]。

目前，基于结构及功能层面仿生突触的人工突触主要包括两端型和三端型器件，如相变存储器（phase-change memory, PCM）、阻变存储器（resistive random access memory, RRAM）、电解质栅晶体管（electrolyte-gated transistor, EGT）、铁电场效应晶体管（ferroelectric field-effect transistor, Fe-FET）和浮栅场效应晶体管（floating-gate field-effect transistor, Fg-FET）等。在这些非易失性存储器中，浮栅场效应晶体管凭借其优异的电隔离特性、增强的电荷存储能力以及灵活的电滞调控性能，被认为是一类极具发展前景的候选器件 [8-10]。在外加电压 / 脉冲激励下，移动电荷可被有效捕获并存储于浮栅层中，同时介质层与隧穿层可有效抑制电荷泄漏。与金属氧化物、电解质和钙钛矿等传统材料相比，低维材料在降低操作能耗、缩小器件尺寸和减少杂散 / 耦合电容方面具备明显优势。迄今为止，二维过渡金属碳 / 氮化物（MXene）因其类金属导电特性、高电导率（> 4600 ± 1100 S/cm）及表面亲水性而受到广泛关注。此外，其 97% 的光透过率与优异的光响应特性也表明 MXene 是构建光学 IMCS 突触浮栅层的理想材料 [7-10]。

本研究首次采用二维碳化钒（V_2CT_x）MXene，通过溶液法（solution processed, SP）制备浮栅场效应晶体管（Fg-FET）的浮栅电荷俘获层（图 1b）。V_2CT_x MXene 此前多用于超级电容器电极，显示出卓越的导电性能。在氧气（O_2）氛围中退火后，V_2CT_x MXene 表面自发生成一层由氧化钒（VO_X）与非晶碳组成的氧化层，该层包覆于 MXene 浮栅层外部，形成自组装隧穿层。同时，本研究采用溶液法制

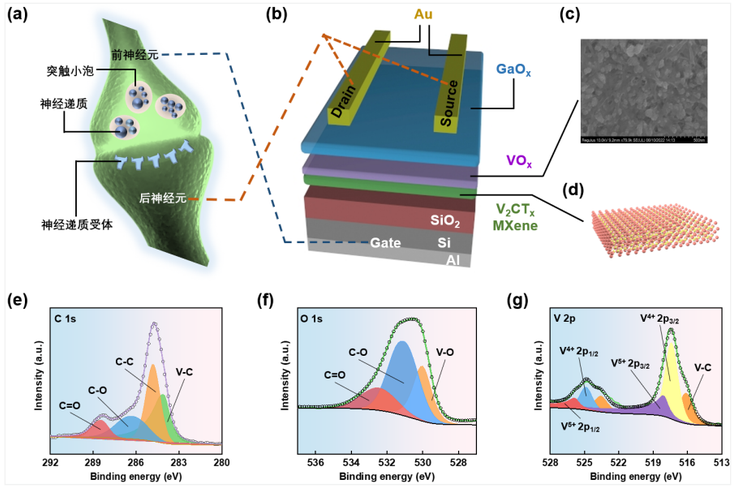


图 1. 器件总体结构和物理表征研究：(a) 生物突触结构示意图；(b) MXene 浮栅突触晶体管结构示意图；(c) MXene 浮栅层扫描电子显微镜（scanning electron microscope , SEM）光学图；(d) V_2CT_x MXene 分子结构示意图；(e) MXene 薄膜的 C 1s XPS 能谱；(f) MXene 薄膜的 O 1s XPS 能谱；(g) MXene 薄膜的 V_2p XPS 能谱

controlled by the excellent adjustability of the charge-trapping layer in recent years. It's one of the most effective solutions to improve the operational efficiency and enhance biomimetic simulation of artificial neuromorphic systems. The emerging two-dimensional (2D) MXene has been considered a popular material candidate for the floating gate fabrication of artificial IMCS synapses because of its high optical sensitivity, excellent electrochemical characteristics, and outstanding hydrophobicity. It was the first time to select the solution-processed vanadium carbide MXene thin film as the floating gate layer of the artificial IMCS synapse in this work. Meanwhile, the self-assembled vanadium oxide thin film formed as the tunneling layer during the annealing process of the MXene thin film. Then the gallium oxide channel layer was deposited onto the tunneling layer by the same method and electrode thin films were deposited by the sputtering method. The floating-gate device exhibited artificial synaptic responses and reliable memorizing performance with electrical and optical stimuli, which simulated the long-term brain-like learning ability. Eventually, the in-memory computing synaptic responses induced by the desired solar-blind ultraviolet photonic stimuli were utilized in the neural network to identify handwriting numbers from dataset, and the recognition accuracy was higher than 95%.

Key words: in-memory computing sensor; non-volatile memory; low-dimensional floating gate layer; artificial synapse.



备的氧化镓（GaO_X）作为沟道层，主要基于其对短波紫外（ultraviolet, UV）光优异的光响应特性。工作中，基于短时程可塑性（short-term plasticity, STP）和长时程可塑性（long-term plasticity, LTP）的人工突触响应，尤其是短时记忆（short-term memory, STM）与长时记忆（long-term memory, LTM）行为受到重点关注；通过电脉冲刺激，成功模拟了类脑“学习 – 遗忘 – 再学习 – 记忆”的仿生行为。此外，还系统研究了该器件在日盲紫外光激发下的突触响应特性，并将其集成于神经网络驱动的神经形态系统中，实现了对 MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology) 手写数字数据集的高精度识别。相比于本领域的类似工作，本研究采用全溶液法制备器件的所有功能层，并利用旋涂过程中浮栅层的表面氧化现象，自组装沉积制备了对厚度具有较高要求的隧穿层，创新性相对较高。且全溶液法有助于实现大规模阵列的制备与集成，配合光、电等模态调控措施模拟多种人脑突触行为，为感存算一体化的大规模集成和应用提供了有效策略 [1-8]。

2. 材料与器件制备

2.1 材料制备

V_2CT_x Mxene 制备：以钒碳化铝（V_2AlC）粉末为原料，采用蚀刻工艺进行处理。具体步骤为：将 V_2AlC 粉末（4 g，纯度 ≥ 99.5%，购于 Sigma-Aldrich 公司）、LiF（4 g，纯度 99.99%，购于 Alfa Aesar 公司）与 HCl 溶液（80 mL，浓度 36%）共同置于 800 mL 聚四氟乙烯反应罐中，在 90° C 条件下反应 72 小时。反应结束后对产物进行离心处理，直至体系 pH 值达到中性。随后将产物转移至 60° C 真空烘箱中干燥 15 小时。之后使用四甲基氢氧化铵（TMAOH，25% 水溶液）对干燥后的产物进行五次洗涤，最后三次洗涤所得的上清液予以收集备用。

GaO_x 前驱体制备：将 5.4988 g 硝酸镓水合物（$Ga(NO_3)_3 \cdot {}_xH_2O$，纯度 99.99%，购于 Sigma-Aldrich 公司）粉末与 10 mL 去离子水混合，经磁力搅拌 1 小时后室温静置 24 小时，获得浓度为 2.0 M 的前驱体溶液。

2.2 器件制备

将 SiO_2/Si 衬底依次在乙醇、丙酮和去离子水中进行超声清洗，每次清洗时间为 10 分钟。清洗完毕后，将干燥的

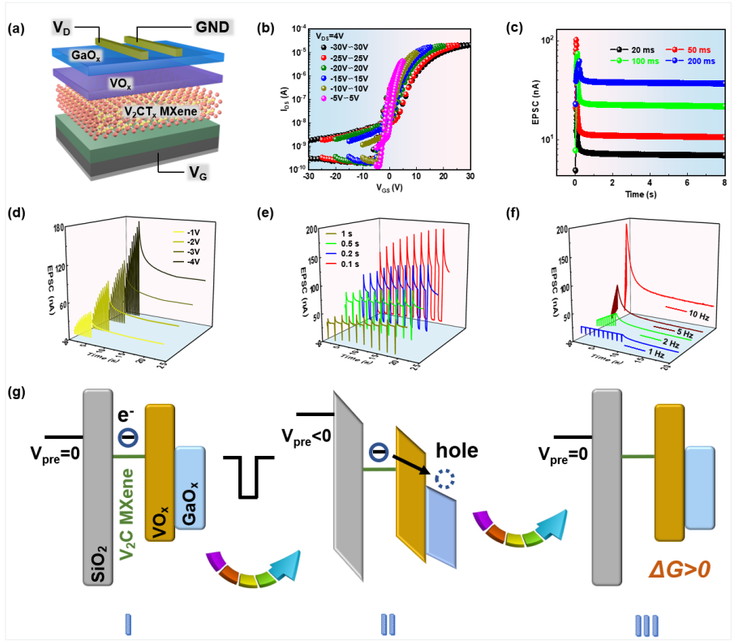


图 2. 器件基本电学特性和机理研究：(a) Fg-FET 器件结构及测试示意图；(b) 不同范围扫描电压下 Fg-FET 器件转移特性（IV）曲线；(c) 单个脉冲下 Fg-FET 器件 EPSC 响应，Fg-FET 器件短期可塑性的；(d) 幅值依赖响应；(e) 脉宽依赖响应；(f) 频率依赖响应；(g) Fg-FET 在负向电压偏置下的不同阶段机理变化示意图

衬底在氧气氛围（PDC-002 HARRICK PLASMA 扩展型等离子清洗机）中进行 20 分钟亲水处理。随后，将浓度为 1.5 mg/mL 的 V_2CT_x MXene 分散液以 3500 rpm 的转速旋涂于衬底表面，持续 30 秒。之后将覆有溶液膜的衬底在 90° C 空气中退火 40 秒，在此过程中形成 V_2CT_x MXene 薄膜及自生长 VO_x 薄膜。接着，将 2.0 M 的 $Ga(NO_3)_3 \cdot xH_2O$ 溶液以 3500 rpm 的转速旋涂于 VO_x 薄膜表面，持续 40 秒。将 SiO_2/Si 衬底上的薄膜在 200° C 下退火 1 小时。最后采用磁控溅射法（北京泰科诺 JCP200 型磁控溅射镀膜机）在 GaO_x 薄膜表面沉积 Au 电极，分别作为漏极和源极。

3. 结果与讨论

图 1c 显示了 MXene 薄膜的扫描电子显微镜（SEM）光学图像，可观察到自沉积 VO^x 薄膜呈现颗粒状形貌，表明溶液法制备的 V_2CT_x MXene 浮栅层发生了氧化 [11-13]。图 1d 为 V_2CT_x MXene 的分子结构示意图 [12]。图 1e-1g 为 MXene 薄膜的 X 射线光电子能谱（XPS）表征结果：图 1e 为 MXene 薄膜的 C 1s 谱，其中位于 284.06 eV 的 V-C 键证实了已成功旋涂制备 V_2C MXene 薄膜；图 1f 和 1g 分别为 VOx 薄膜的 O 1s 和 V_2p 谱，位于 530.03 eV 的 V-O 键和 516.13 eV 的 V-C（$2p^{3/2}$）键证明了自沉积 VO_x 薄膜的成功制备 [14-18]。

如图 2a 所示，当在栅极（V_G）和漏极（V_D）端施加不同偏压时，Fg-FET 器件可测得具有顺时针滞后回线的转移特性曲线（图 2b）。随着 V_G 扫描范围从 ±5 V 增大至 ±30 V，阈值电压出现明显负向偏移，该现象归因于隧穿 - 浮栅（VOx–MXene）结构与浮栅效应。不同偏压诱导的滞后行为差异表明器件具备响应外部脉冲刺激的突触潜力。在人工突触可塑性测试中，栅极作为突触前膜（V_{pre}，图 1b），漏极与源极则实现突触后膜功能（V_{post}，图 1b）[1, 2]。漏极在外刺激下诱导的电流响应用于模拟突触后电流（postsynaptic current, PSC）或电导（conductance, G）的变化；图 2c 展示了不同脉冲宽度的单个脉冲刺激可诱发兴奋性突触后电流（excitatory postsynaptic current, EPSC）。图 2d–2f 显示了在特定脉冲时段内，器件对不同参数连续电脉冲的短期突触响应行为：随着电刺激幅度增大，短期突触响应显著增强（图 2d），与已报道的 EPSC 增益调控规律一致；脉冲宽度（图 2e）与脉冲频率（图 2f）的变化亦引起类似的响应调制现象。

图 2g 讨论了 Fg-FET 器件的工作机制：在 I 状态下，VO_x 与 MXene 的导带（E_c）差异形成势垒，使电子在无外偏压时被捕获于浮栅层中；在负偏置（$-V_{pre}$）作用下（II 状态），Ec 的偏移促使被捕获电荷在电场作用下通过隧穿层进入沟道层；沟道层中电子的积累降低了电阻状态，导致 III 状态下电导呈现增强趋势。相反，正偏置（V_{pre}）会减少沟道中的电子浓度，从而降低电导值。偏压撤除后，电子再次被捕获于 MXene 浮栅层中。由于 VO_x 和 SiO_2 层的存在，电子的逃逸受到抑制，从而增强了 Fg-FET 器件的非易失存储性能 [19-21]。

图 3 展示了 Fg-FET 器件在长期人工突触可塑性响应方面的训练结果。艾宾浩斯遗忘曲线揭示了人脑接受外部信息时逐渐形成的“学习 - 遗忘 - 再学习”行为过程。通过连续电刺激（-4 V，200 ms），Fg-FET 器件也实现了类似的仿生行为。在该器件中，栅极电压 Vpre 与电导值 G 可分别类比为人脑所接收的外部刺激与记忆状态 [1-4]。图 3a 展示了器件的写入 / 擦除过程，其中擦除操作通过连续反向脉冲实现。擦除脉冲可视为外部干扰，该类干扰常对人脑的学习与记忆行为产生负面影响。随着擦除脉冲幅值从 4 V 降低至 1 V，剩余电导值呈上升趋势，对应仿生学习 / 记忆行为的减弱。图 3b–3d 分别展示了学习、自然遗忘及再学习过程中的人工突触响应。图 3d 中，器件表现出与图 3b 相似的电导状态，而在无电脉冲刺激时则出现类脑自然遗忘行为（图 3c）。再学习过程所需的脉冲数少于初始学习过程，表明器件成功模拟了类脑学习行为，并体现出从短时记忆（STM）向长时记忆（LTM）转化的潜力。

同样地，我们在 5×5 器件阵列中进行了类似测试（图 3e、4a）。图 3e(i)–e(v) 分别展示了初始状态、学习、自然遗忘、再学习和记忆状态；其中字母“N”的学习演示成功实现了从 STM 到 LTM 的转变。图 3f 和 3g 展示了人工长时程增强（LTP）响应，包括长时程增强与抑制行为：图 3f 为 300 次负脉冲（-4 V，200 ms）和 300 次正脉冲（+4 V，200 ms）诱导的增强与抑制响应，分别对应兴奋性与抑制性突触活动；图 3g 为重复电脉冲（±3 V，200 ms）下的兴奋与抑制活动，每个刺激周期中电导的变化均表现出相似的趋势。

除了电学刺激，我们也采用了相应的光学刺激对器件的人工突触特性进行了研究。GaO_x 的光响应波长介于 200-300 nm 之间，属于日盲紫外波段 [22-24]。因此如图 4a 所示，在测试中对 Fg-FET 器件采用了 254 nm 紫外光进行照射。为进一步研究器件对常见的 365 nm 紫外光的光学突触响应，在 Au 电极（漏极和源极）与 GaO_x 沟道层薄膜之间插入了溶液法制备的 $CsPbBr_3$ 钙钛矿（PVK）光敏层，构成 PVK Fg-FET 器件（图 4b）。

为分析电刺激与光刺激下人工突触响应差异，在特定刺激参数（幅度、频

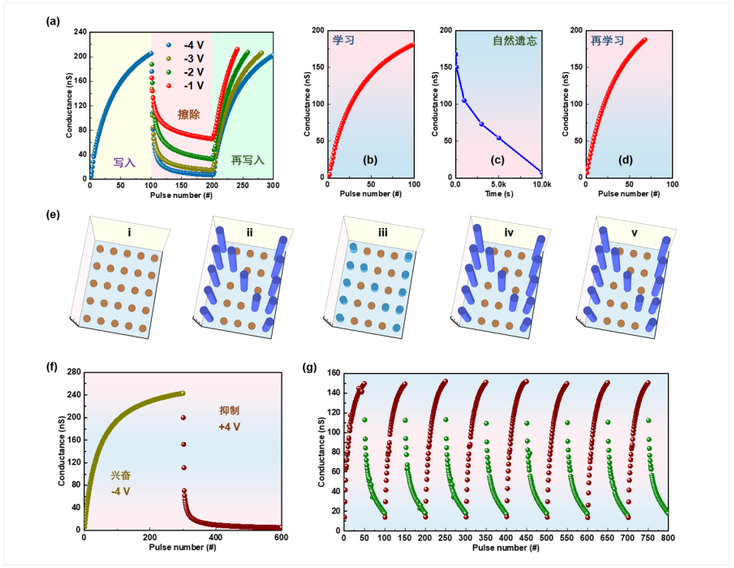


图 3. 器件及阵列人工突触特性研究：(a) 单个 Fg-FET 器件的写入 / 擦除特性对 VD 电压偏置的依赖性响应；(b) 学习；(c) 自然遗忘；(d) 再学习的类脑行为模拟；(e) Fg-FET 阵列在（i）初始、（ii）学习、（iii）遗忘、（iv）再学习、（v）长期记忆状态下的类脑行为模拟；(f) 单个 Fg-FET 器件在连续电脉冲刺激下触发的长期兴奋和抑制特性；(g) 单个 Fg-FET 器件可稳定重复的长期可塑性

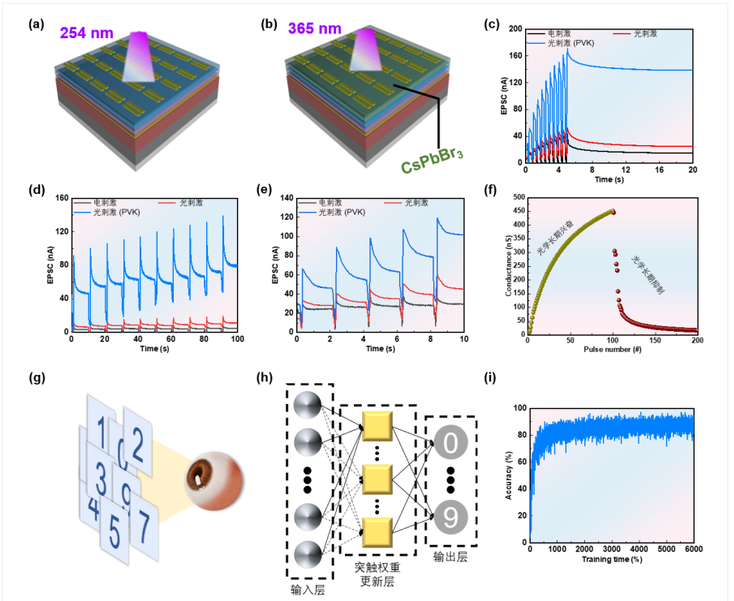


图 4. 器件光学突触特性及神经形态应用研究：(a) 254nm 短波紫外光脉冲测试示意图；(b) 添加 CsPbBr3 钙钛矿感光层后 365nm 紫外光测试示意图；(c) 幅值依赖响应；(d) 脉宽依赖响应；(e) 频率依赖响应；(f) Fg-FET 器件光脉冲刺激下的长期兴奋和抑制特性；(g) 数字识别型神经形态应用示意图；(h) 神经网络结构示意图；(i) 手写数字识别精度结果

率、宽度）下我们测试了器件的兴奋性突触后电流（EPSC），性能如图 4c–4e 所示：黑色曲线（标注“电刺激”）表示 Fg-FET 在纯电脉冲下的突触特性；红色曲线（标注“光刺激”）和蓝色曲线（标注“光刺激 (PVK)”）分别代表 Fg-FET 在 254 nm 紫外光、PVK Fg-FET 在 365 nm 光刺激下的光学突触响应。与纯电脉冲相比，直接对 GaO_x 沟道层施加相应光刺激可显著增强 Fg-FET 器件的光学突触响应；而由于 $CsPbBr_3$ PVK 层更高的光敏感性，PVK Fg-FET 可表现出更明显的 EPSC 响应。最后在图 4f 中，我们研究了在 254 nm 紫外光（100 mW）刺激下无 PVK 层的 Fg-FET 器件的长时程增强与抑制行为，表明其具备光诱导长时可塑性（LTP）。基于图 4f 的长期兴奋和长期抑制型突触响应，我们根据下列公式（Eq. 4-1 和 4-2）对相关特征参数进行了统计和提取：

$G^+ = G^+_{min} + \frac{G^+_{max} - G^+_{min}}{1 - e^{-N^+_L P^+}}(1 - e^{-N^+_L P^+})$	Eq.4-1
$G^- = G^-_{min} + \frac{G^-_{max} - G^-_{min}}{1 - e^{-N^-_L P^-}}(1 - e^{N^-_L (P^+ - P^-)})$	Eq.4-2

其中，G^+ 和 G^- 分别代表归一化后的兴奋型和抑制型电导，N^+_L 和 N^-_L 分别代表相应的非线性度。经计算，特征参数分别为 1.37724×10^{-6}（G^+）、6.54333×10^{-7}（G^-）、0.83（N^+_L）和 2.13（N^-_L）。基于上述特征参数，通过具有多层感知结构的人工神经网络（artificial neuron network, ANN）对来自 MNIST 数据库中的手写数字进行识别 [1-4, 9]，如图 4g 和 4h 所示，经过 6000 次训练后，其识别精度如图 4f 所示，最高可达 95%。

4. 结论

本研究提出了一种基于低维材料的溶液法制浮栅型人工突触，其浮栅层采用低维 V_2CT_x MXene 材料制备而成。通过旋涂 V_2CT_x MXene 层的退火过程，自沉积形成了 VO_x 隧穿层。通过系统测试，研究了该器件基于短时程与长时程可塑性的人工突触行为。该器件在电刺激下实现了“学习 - 遗忘 - 再学习 - 记忆”的类脑模拟，完成了从短时记忆向长时记忆的转变。此外，凭借 GaO_x 沟道层的光敏特性，该器件在短波紫外光刺激下也表现出短时与长时人工突触响应。进一步地，相关光学突触性能被应用于人工神经形态网络的训练过程中，成功实现了对手写数字的高准确率识别，表明该器件在深度学习与神经形态系统领域具有巨大潜力。

参考文献

[1] Y. Cao et al., "Neuromorphic visual artificial synapse in-memory computing systems based on GeO_x-coated MXene nanosheets," Nano Energy, vol. 112, p. 108441, 2023, doi: 10.1016/j.nanoen.2023.108441.

[2] J. Li et al., "Artificial synapses enabled neuromorphic computing: From blueprints to reality," Nano Energy, vol. 103, p. 107744, 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107744.

[3] Z. Shen et al., "Full - vdW Heterosynaptic Memtransistor with the Ferroelectric Inserted Functional Layer and its Neuromorphic Applications," Advanced Functional Materials, vol. 35, no. 2, p. 2412832, 2024, doi: 10.1002/adfm.202412832.

[4] Z. Shen et al., "Emerging Optical In - Memory Computing Sensor Synapses Based on Low - Dimensional Nanomaterials for Neuromorphic Networks," Advanced Intelligent Systems, vol. 4, no. 9, p. 2100236, 2022, doi: 10.1002/aisy.202100236.

[5] Z. Shen et al., "Advances of RRAM Devices: Resistive Switching Mechanisms, Materials and Bionic Synaptic Application," Nanomaterials, vol. 10, no. 8, p. 1437, Jul 23 2020, doi: 10.3390/nano10081437.

[6] Z. Wang et al., "Array-level MXene electrode flexible long-term-plasticity synaptic transistors," Materials Horizons, vol. 12, no. 17, p. 6842, Aug 26 2025, doi: 10.1039/d5mh00447k.

[7] J. Yao et al., "Ultra-low power carbon nanotube/porphyrin synaptic arrays for persistent photoconductivity and neuromorphic computing," Nature Communications, vol. 15, no. 1, p. 6147, Jul 21 2024, doi: 10.1038/s41467-024-50490-y.

[8] A. Younis et al., "Advances in MXene - Based Electronics via Surface and Structural Redesigning and Beyond," Advanced Electronic Materials, vol. 2, no. 31, p. e00321, 2025, doi: 10.1002/aelm.202500321.

[9] T. Zhao et al., "Bio - Inspired Photoelectric Artificial Synapse based on Two - Dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXenes Floating Gate," Advanced Functional Materials, vol. 31, no. 45, p. 2106000, 2021, doi: 10.1002/adfm.202106000.

[10] J. Zhu et al., "Flexible Low - Voltage MXene Floating - Gate Synaptic Transistor for Neuromorphic Computing and Cognitive Learning," Advanced Functional Materials, vol. 34, no. 40, p. 2403842, 2024, doi: 10.1002/adfm.202403842.

[11] G. Ying, S. Kota, A. D. Dillon, A. T. Fafarman, and M. W. Barsoum, "Conductive transparent V_2CT_x (MXene) films," FlatChem, vol. 8, p. 25, 2018, doi: 10.1016/j.flatc.2018.03.001.

[12] R. A. Beers, D. Bao, and J. R. Ray, "Chemical Intercalant Affects the Structural Properties and Aqueous Stability of V_2CT_x MXene," Advanced Materials Interfaces, vol. 12, no. 14, p. e00145, 2025, doi: 10.1002/admi.202500145.

[13] L. Wang et al., "Cooperative energy storage behaviors derived from PANI and V_2CT_x MXene for advanced aqueous zinc-ion batteries," Journal of Alloys and Compounds, vol. 945, p. 169366, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.169366.

[14] F. Liu, Y. Liu, X. Zhao, K. Liu, H. Yin, and L. Z. Fan, "Prelithiated V_2C MXene: A High-Performance Electrode for Hybrid Magnesium/Lithium-Ion Batteries by Ion Cointercalation," Small, vol. 16, no. 8, p. e1906076, Feb 2020, doi: 10.1002/smll.201906076.

[15] Y. Guan et al., "A hydrofluoric acid-free synthesis of 2D vanadium carbide (V_2C) MXene for supercapacitor electrodes," 2D Materials, vol. 7, no. 2, p. 025010, 2020, doi: 10.1088/2053-1583/ab6706.

[16] H. Liu et al., "Combinations of V_2C and Ti_3C_2 MXenes for Boosting the Hydrogen Storage Performances of MgH_2," ACS Applied Material Interfaces, vol. 13, no. 11, p. 13235, Mar 24 2021, doi: 10.1021/acsami.0c23150.

[17] K. Sun et al., "Room Temperature Phase Transition of W - Doped VO_2 by Atomic Layer Deposition on 200 mm Si Wafers and Flexible Substrates," Advanced Optical Materials, vol. 10, no. 23, p. 2201326, 2022, doi: 10.1002/adom.202201326.

[18] Z. Xiang et al., "Optimized thermochromic properties for smart window application of VO_2 films by wet-etching process," Optical Materials, vol. 128, p. 112359, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112359.

[19] B. Lyu et al., "2D MXene-TiO_2 Core-Shell Nanosheets as a Data-Storage Medium in Memory Devices," Advanced Materials, vol. 32, no. 17, p. e1907633, Apr 2020, doi: 10.1002/adma.201907633.

[20] S. Kim et al., "Gate - Deterministic Remote Doping Enables Highly Retentive Graphene - MXene Hybrid Memory Devices on Plastic," Advanced Functional Materials, vol. 32, no. 20, p. 2111956, 2022, doi: 10.1002/adfm.202111956.

[21] Y. Gong, X. Xing, Y. Wang, Z. Lv, Y. Zhou, and S. T. Han, "Emerging MXenes for Functional Memories," Small Science, vol. 1, no. 9, p. 2100006, Sep 2021, doi: 10.1002/smsc.202100006.

[22] J. Luo et al., "Catalyst-Free Polymorphic beta-Ga_2O_3 Nanomaterials for Solar-Blind Optoelectronic Devices: Applications in Imaging and Neural Communication," Small Methods, vol. 9, no. 7, p. e2401473, Jul 2025, doi: 10.1002/smtd.202401473.

[23] F. Gao et al., "Amorphous Ga_2O_3 Based Erasable Two - Terminal Artificial Photonic Synapses," Advanced Optical Materials, vol. 13, no. 12, p. 2403227, 2025, doi: 10.1002/adom.202403227.

[24] S. Sun et al., "Fully UV Modulated Artificial Synapses with Integrated Sensing, Storage and Computation," Advanced Functional Materials, vol. 34, no. 36, p. 2401403, 2024, doi: 10.1002/adfm.202401403.



芯片传感技术在大健康领域的应用

CHIPS Based Sensing Technology and Its Applications in Healthcare

陈 伟 Abhishek Kandwal Jang Yong Kim Arjun Kumar 陆骐峰 沈棕杰 高 源

（西交利物浦大学芯片学院）

摘要：西交利物浦大学芯片学院瞄准芯片领域的高端技术，聚焦前沿科学问题和技术难题，强化学科交叉融合以及行业合作，培养国家急需的具有创新能力、国际视野和企业家精神的芯片领域高层级应用和领导型人才。目前，芯片学院设置微电子科学与工程本科专业、先进微电子技术与材料硕士专业和博士研究生专业。本科专业着力学生广泛学习行业技能，深入研究集成电路硬件知识及应用，扎实掌握半导体及芯片技术，课程内容涉及电路设计、集成电路布图自动化、芯片制造、集成电路工艺、测试与封装；硕士专业主要深入讲授微电子器件和微纳制造技术，硕士和博士课题基于微电子技术在传感技术、AI 技术新型芯片材料和大健康领域前沿研究进行探索。学院以校企合作、多学科交叉融合（尤其是芯片技术在生物医学健康领域的应用）、结合人工智能为三大发展方向。随着学生规模的快速增长，芯片学院将着力建设高水平国际化师资队伍，满足学生发展的需求。同时，在未来积极探索融合式教育模式，培养市场紧缺的既懂芯片技术、又懂管理和金融的融合式人才。这里我们重点介绍在芯片传感技术方面的科研和应用（尤其在大健康领域的应用，包括面向生物体液监测的柔性可穿戴微流道传感器芯片、神经形态器件与芯片的应用研究）、高灵敏度柔性可穿戴射频传感器的血糖探测、无源射频传感器芯片用于医疗保健领域感知与检测、超灵敏磁电 MEMS 传感器医学检测及芯片成像技术在脑成像中的应用。

关键词：芯片、半导体、MEMS、集成电路、传感器、大健康、成像、探测

1. 面向生物体液监测的柔性可穿戴微流道传感器芯片

人体体液中富含多种生物标记物，例如钾、钙等离子，以及葡萄糖、皮质醇、乳酸等关键分子。通过对这些标记物浓度的动态追踪，可实现对个体健康状况的精细监测与慢性病的有效管理。然而，传统检测方法多依赖于侵入性的临床采样与分析，这不仅限制了监测的频率与实时性，也给患者带来不适，并增加了医疗成本。因此，开发无创、便捷、实时连续监测的新型传感器，已成为该领域迫切的需求与研究热点。近年来，柔性电子的快速发展，催生了微流道传感器的诞生，这类传感器通过在柔性基底上构建微米级通道并集成高灵敏度传感元件，能够对微量体液进行精准分析，相较于传统技术，其柔性、轻便的特性极大地提升了长期佩戴的舒适性。更重要的是，建立在其易于集成的特点上，它能够实现多模态检测，即同时监测多个生物标记物的浓度，以及生物体液的流速。因此，微流道传感器技术在可穿戴健康监测领域前景广阔，当前主要集中在体液流速的动态传感以及多种生物标记物的浓度量化等多个核心方向。

Core Summary

School of CHIPS, Xi'an Jiaotong-Liverpool University aims to focus on high-end technologies in the chip field, addressing cutting-edge scientific issues and technical challenges. It emphasizes interdisciplinary integration and industry collaboration to cultivate high-level application and leadership talents in the chip sector who possess innovative capabilities, an international perspective, and entrepreneurial spirit, which are urgently needed by the nation. Currently, the Chip Institute offers an undergraduate program in Microelectronics Science and Engineering, a master's program in Advanced Microelectronics Technology and Materials, and a doctoral program. The undergraduate program emphasizes broad industry skill acquisition, in-depth research on integrated circuit hardware knowledge and applications, and solid mastery of semiconductor and chips based technologies. The curriculum includes circuit design, integrated circuit

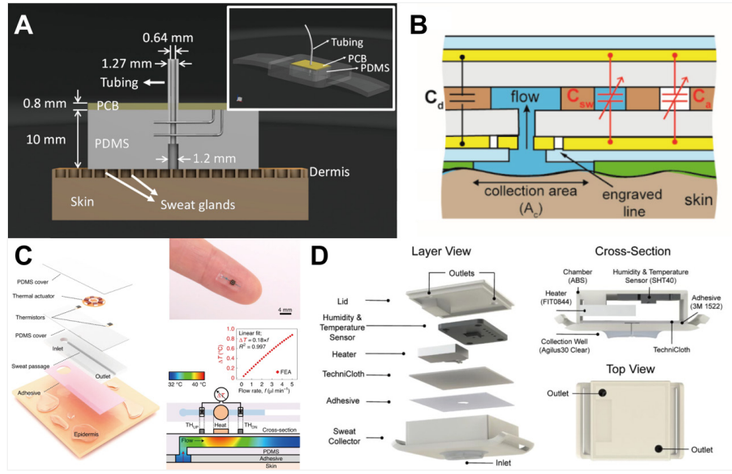


图 1-1. 用于生物体液流速传感的微流控传感器：(A) 通过电导传感汗液流速的传感器 [1]; (B) 电容式微流控传感器示意图 [2]; (C) 基于热学方法检测汗液流速的平台 [3]; (D) 基于蒸发原理监测汗液流速的可穿戴设备 [4]

1.1 微流道传感器用于生物体液流速传感

在生物体液流速方面，汗液流速是一个尤为关键的生理指标。它不仅直接反映了人体的热调节状态，更是评估个体水合水平与电解质平衡的重要依据。因此，对汗液流速进行实时、精确的监测，对于预防在运动或高温环境下可能出现的脱水、电解质紊乱等并发症具有重大的临床意义。为实现这一监测目标，目前主流的传感技术主要包括电化学方法、以及热学方法等。

电化学方法主要通过人体汗液与空气不同的电学特性这一点来完成测量，如图 1-1A 所示，Liu 等人开发了一套完整的可穿戴汗液电导率传感设备，并通过人体实验成功验证了其进行实时、无创生理监测的可行性 [1]。而电容法则是基于平行板电容器的原理完成测量，其建立在空气和汗液的介电常数不同上，当体液流入微流道后，将会改变电容值，通过监测电容值的变化来间接推算出体液的流速。图 1-1B 展示了 choi 等人的工作，他们开发并验证了一款低成本、易于制造的可穿戴电容式微流控传感器，该传感器通过简单的激光切割和胶带组装，实现了对汗液流速的实时、精确测量 [2]。然而，基于电化学方法在长期传感体液流速上仍受到一些限制，其一，当流道内充满液体时，其将无法继续测量；同时，体液内的电解质会在电极表面堆积，从而影响其长期测量的能力。

热学方法通过受控热源加热汗液，并通过分析其交互产生的热物理效应来监测汗液流速，目前已有多种基于此原理的设备。例如，Kwon 等人开发了一种非接触式热传感无线平台，可实时、同步地测量汗液流速（图 1-1C）[3]。此外，如图 1-1D 所示，Aggarwal 等人报道了一种新型可穿戴设备，它利用加热器蒸发汗液，再通过湿度传感器进行追踪，实现了紧凑、可复用且不会饱和的

layout automation, chip manufacturing, integrated circuit processes, testing, and packaging. The master's program delves into microelectronic devices and micro-nano manufacturing technologies, with master's and doctoral research topics exploring frontier research in microelectronics technology applied to sensing technology, AI technology, new chip materials, and the field of health and wellness. The institute focuses on three main development directions: school-enterprise collaboration, interdisciplinary integration, particularly the application of chip technology in biomedical health, and the integration of artificial intelligence. With the rapid growth of student enrollment, the Chip Institute will strive to build a high-level international faculty team to meet the developmental needs of students. Additionally, it will actively explore integrated education models in the future to cultivate talents who are in short supply in the market-those who understand both chip technology and management and finance. Here, we highlight our research and applications in chip sensing technology, especially in the health and wellness sector, including flexible wearable microfluidic sensor chips for monitoring biological fluids, research on neuromorphic devices and chips, high-sensitivity flexible wearable RF sensors for glucose detection, battery-free RF sensor chips for perception and detection in healthcare, ultra-sensitive magnetoelectric MEMS sensors for medical detection, and chip imaging technology applications in brain imaging.

Key words: Chips, Semiconductor, MEMS, Integrated Circuit, Sensors, Healthcare, Imaging, Detection

长时间监测[4]。然而，所有基于热学的方法都面临一个共同的挑战，加热过程可能会导致汗液中敏感的生物标记物失活，从而导致在与生物标记物同时监测方面存在一定挑战。

1.2 微流道传感器用于生物标记物浓度传感

现如今，基于微流道传感器实现生物标记物浓度传感，主要基于以下几种方法：抗原抗体结合、分子印迹聚合物（Molecularly Imprinted Polymer, MIP）、核酸适配体（Aptamer）等。具体地，抗原抗体结合基于生物免疫系统中的核心反应，即抗体分子与相应抗原分子发生高度特异性、非共价的结合过程。例如，Krivitsky 等人构建的抗体修饰硅纳米线传感器，通过应用抗原解离模式来实现低样本体积下的快速检测（图 1-2A）[5]。然而，抗体在长期监测中的稳定性不足以及其与抗原结合的不可

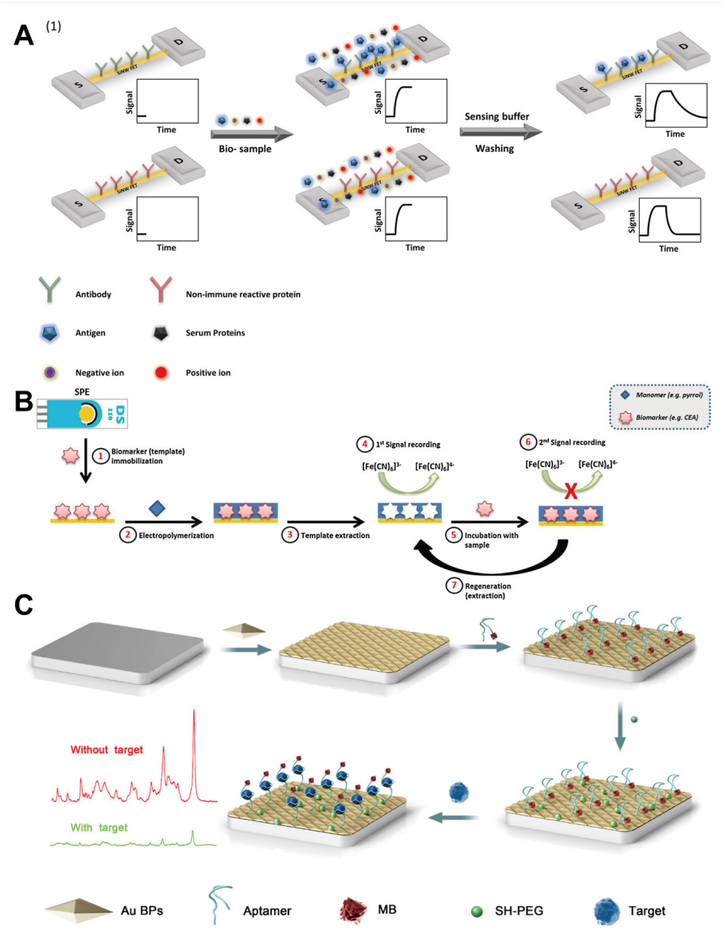


图 1-2. 用于生物标记物浓度传感的微流控传感器：(A) 利用抗原抗体结合的传感器原理示意图[5]；(B) 基于分子印迹聚合物技术实现的传感器原理示意图[6]；(C) 应用 Aptamer 技术实现的生物标记物传感器原理示意图[7]

逆性，限制了该技术的进一步发展。为应对这些挑战，研究人员将目标转向了 MIP 技术和 Aptamer 技术。MIP 通过“分子印迹”技术，在聚合物网络中制造出与特定目标分子在形状、大小和功能基团上互补的三维识别位点。Pacheco 等人基于 MIP 技术，实现了对人体体液中乳腺癌生物标记物 CA15-3 的快速高精度检测[6]，图 1-2B 展示了他们的工作；而 Aptamer 是通过体外筛选技术筛选出的短链单链 DNA 或 RNA 分子。这些核酸分子能够折叠成特定的三维结构，从而以高亲和力和高特异性与多种目标分子（包括蛋白质、小分子、离子甚至整个细胞）结合，展现出巨大的应用潜力，图 1-3C 展示了 Aptamer 的一个范例。

2. 神经形态器件与芯片及潜在应用

2.1 引言

神经形态计算是一种借鉴生物神经网络结构与信息处理机制的新型计算范式，旨在通过硬件模拟人脑的高效并行、超低功耗及自适应学习能力。随着人工智能与物联网技术的迅猛发展，传统冯 · 诺依曼架构瓶颈已难以满足边缘计算场景对能效与实时性的严苛要求。神经形态硬件通过实现感存算一体化架构，有望从根本上突破这一瓶颈，为智能医疗、脑机接口等生物医学应用提供技术基础。神经形态器件与芯片的发展，经历了从硅基模拟到新型纳米器件的演进。早期神经形态硬件主要采用互补金属氧化物半导体（CMOS）技术模拟生物神经元与突触的功能，在实现了基本的脉冲刺激响应与突触可塑性的同时又受限于器件面积与能耗。近年来，基于忆阻器、晶体管等新型器件的神经形态计算技术取得了显著进展，这些器件不仅能模拟丰富的神经动态行为，还能实现更高的能效与集成密度，为与生物系统的深度融合创造了条件。

本章节将针对神经形态器件与芯片的研究进展进行综述，重点分析了材料、器件结构及芯片架构，并深入探讨了其在生物医疗领域的应用前景与挑战。通过剖析当前技术发展态势，为未来神经形态计算技术的创新与应用提供参考。

2.2 神经形态器件材料体系

2.2.1 金属氧化物

如图 2-1 所示，传统材料如硅、锗等传统半导体，虽然成熟度高、工艺兼容性好，但在模拟生物突触行为方面灵活性有限，主要包括稳定性较好的各类金属氧化物，如氧化铪（HfO2）、氧化钽（Ta2O5）等，因其 CMOS 工艺兼容性与良好的电阻开关特性，被广泛应用于忆阻器的阻变层。国立阳明交通大学 Po-Tsun Liu 团队研发的基于氧化钨（WO_3）与钨掺杂氧化锌铟（InWZnO）全金属氧化物异质接面的“光电突触电晶体”，成功模拟了人脑突触的学习与记忆行为，实现了类生物神经系统的多重突触可塑性表现。该元件分别在 650、525 与 460 纳米可见光波段下展现出极高的光响应度，远高于现有文献中的同类型元件。透过光脉冲刺激与闸极电压调控，该元件成功模拟了短期记忆与长期记忆之转换，显示了其在动态突触行为上的出色再现能力[8]。

2.2.2 低维材料—零维（0D）、一维（1D）、二维（2D）材料

低维纳米材料如今已被广泛应用于神经形态器件与芯片的研究中，主要包括零维、一维、二维材料。零维材料如量子点（quantum dot, QD）和纳米颗粒（nanoparticle, NP），具有量子限域效应和尺寸依赖的光电特性，可通过溶液法制备，在光电突触中显示出应用潜力。以碳纳米管（carbon nanotube, CNT）为代表的一维材料，具有高载流子迁移率和机械强度，是构建柔性神经形态器件的理想材料。中科院苏州纳米

所康黎星团队通过化学气相输运制备，成功将双链硒封装在单壁碳纳米管内部，研发了硒内嵌单壁碳纳米管（Se@SWCNTs）一维范德华异质结。利用溶液沉积技术制备的大面积半导体性 Se@SWCNTs 薄膜，在柔性基底上构建了 4 英寸晶圆级的光电晶体管阵列。该器件结合有效的栅极调制，实现了对持久正 / 负光电导的高度线性和精确控制，其线性拟合相关系数超过 0.99，同时实现了超过 128 个存储态的线性正 / 负光电导状态。这种线性对称的可塑性对于神经网络训练至关重要，可显著提高识别精度 [9]。

二维材料凭借原子级厚度、无悬挂键表面及独特光电特性，在神经形态器件中展现出巨大潜力。其中，过渡金属二硫化物（如 MoS_2）具有合适的带隙与强烈的光 - 物质相互作用，可用于构建光电突触；六方氮化硼（h-BN）则作为理想的介电层或隔离层。当前，Janus 二维材料（如 WSSe）是新兴的二维材料类别，其两面具有不同的物理化学性质，为神经形态器件设计提供了新机遇。首尔大学 Jonghwa Eom 团队构建了 Au/h-BN/WSSe 和 Gr/h-BN/WSSe 异质结，其中金和石墨烯作为浮栅材料，h-BN 作为隧穿层。石墨烯浮栅器件表现出显著且一致的内存窗口，以及优异的耐久性（105 个周期）和保持特性（106 秒）。这种不对称结构为载流子传输调控提供了额外自由度，可用于实现更复杂的神经形态功能。

2.2.3 有机材料与有机 - 无机杂化材料

神经形态器件领域中常见的有机材料包括有机半导体材料和有机混合离子电子导体。有机半导体材料如聚 (3- 己基噻吩)(P3HT) 等共轭聚合物与小分子半导体，具备溶液加工性、柔性与良好的生物相容性。有机混合离子电子导体如 聚 (benzimidazobenzophenanthroline) (BBL)，能够模拟生物神经元的离子动态行为，在单晶体管有机电化学神经元中实现了 17 种不同的神经发放模式。因此，基于有机混合离子电子导体（organic mixed ionic-electronic conductors, OMIECs）的有机电化学突触晶体管（organic electrochemical synaptic transistor, OEST），可以为生物启发神经形态计算和生物电子学提供有前景的平台。例如，阿卜杜拉国王科技大学（KAUST）Sahika Ina 报道了一种由半固态离子液体凝胶门控的固态 OEST，其中热退火通过调整薄膜微观结构和离子 - 聚合物相互作用，显著增强了记忆特性和操作可靠性。优化后的器件在五个不同的状态下，在 1000 秒内实现了具有 82% 保留率的稳定多级电导，并且在环境条件下超过 20000 次操作循环后漂移可忽略不计 [10]。

2.3 神经形态器件结构体系

2.3.1 单一功能层结构

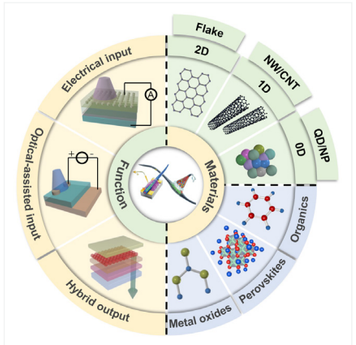


图 2-1. 神经形态器件基于不同材料种类以及器件功能的综合性分类

单一功能层结构通过材料本征特性或简单几何设计实现神经形态功能，具有结构简洁、易于集成的优势。两端忆阻器（resistive random access memory, RRAM）是最简单的神经形态器件结构，通常由金属 - 介质层 - 金属组成，单一功能层主要负责器件的阻变特性。其电阻转变机制多样，包括导电细丝形成与断裂、空位迁移与相转变等。如西交利物浦大学赵春团队探讨了退火温度对溶液法制备 Ni/AlOx/Pt RRAM 器件性能的影响，发现 250° C 为最佳退火温度，其性能（高开关比、低操作电压）与单一阻变层中羟基浓度密切相关 [11]。三端突触晶体管通过栅极调控沟道电导，更接近生物突触的工作机制。电解质栅控场效应晶体管利用电解质中的离子迁移模拟神经递质的释放与重吸收，是模拟生物突触的理想平台。此外，前述的有机电化学突触晶体管（OEST）也是单一功能层结构的优秀代表。

2.3.2 多功能层堆叠结构与多材料异质结构

多功能层堆叠结构通过垂直集成不同功能材料层，实现更复杂的神经形态行为与更高的功能密度，典型代表为多层阻变层结构的两端忆阻器和浮栅型突触晶体管。西交利物浦大学赵春团队开发了基于溶液法制备的 GaOx/AlOx 堆叠结构 RRAM 器件，相比单层器件具有更低功耗、更高开关比和优异稳定性，并在 MNIST 手写数字识别中实现 96% 准确率。此外还开发了基于 MXenes 浮栅、TiO2/ZTO 沟道的光电人工突触晶体管，首次实现了紫外光响应的突触可塑性，能耗低至 100fJ。两项研究均成功模拟了条件反射和学习 - 遗忘行为，并在 MNIST 手写数字识别中展现出高精度识别的应用潜力 [12, 13]。

相比于多功能层堆叠结构，多材料异质结构则侧重于通过能带工程与界面调控，整合不同材料的优越特性，实现单一材料无法企及的功能性能。如中科院苏州纳米所曾中明团队开发了基于全二维范德华（vdW）功能层的铁电忆阻晶体管，创新性地采用铁电材料 $CuInP_2S_6$ 作为插入功能层，通过其极化翻转与层间耦合的协同效应调控 SnS_2 沟道载流子，实现了 3.06 pJ 的超低能耗的突触塑性。该器件成功模拟了“学习 - 遗忘 - 再学习 - 记忆”的类脑行为，并基于此构建了智能汽车识别系统，对行人识别准确率高达 98%，进一步集成机械臂实现了目标的精准抓取与传送 [14]。

2.4 神经形态芯片架构与集成

2.4.1 感存算一体架构

感存算一体架构通过消除数据迁移实现信息的高效处理，特别适合边缘计算与实时处理场景。这种架构模仿生物感知系统，将感知、存储与计算功能集成在单一器件或紧密耦合的单元中。如前述国立阳明交通大学 Po-Tsun Liu 团队开发的光电突触阵列实现了视觉信息的原位感知与处理。该阵列能够实时接收红绿蓝三原色光信号并模拟学习与记忆，呈现类似人眼视网膜对影像强度与颜色的分层式感知与储存机制。将此突触元件导入人工神经网络模拟平台中，针对手写数字辨识与图像分割任务进行模拟测试。在经过高斯噪声与条纹噪声等模拟恶劣环境下，系统仍可达到高辨识准确率；在图像分割任务中，搭配 U 型神经网络架构（U-Net）后，可达到接近理想的分割准确率，显示该元件具备极佳的视觉处理稳健性与学习能力 [8]。又如前述中科院苏州纳米所康黎星团队开发的 Se@SWCNTs 光电晶体管阵列通过光学混合编程，实现了受生物启发的脑区功能之间的转换。这种芯片能够自适应处理不同复杂度的视觉任务 - 从初级视觉皮层处理的数字 / 字母识别，到梭状回和 V4 区处理的图案 / 颜色识别，再到需要顶叶内沟等高级中枢参与的动物特征区分，揭示了大脑应对递增认知需求的动态协作机制。

2.4.2 并行处理与可重构架构

并行处理与可重构架构通过多核设计与动态资源配置，提高神经形态芯片的计算效率与灵活性。中科院北京计算技术研究所赵地团队基于 RISC-V 架构开发了开源类脑芯片 Polaris 23（第二代），支持脉冲神经网络（SNN）和反向传播 STDP 学习规则。该芯片的神经形态处理单元包含了神经形态自定义 SNN 指令扩展集：RV-SNN 2.0，并包括 SNN 发射单元、LIF 神经元更新单元、突触计算单元三个组成部分。为了提高处理神经元和突触的能力，神经形态指令处理器设计了多发射架构，例如，在双发射模式下，可以同时执行两条神经形态指令。并行执行架构进一步提高了芯片的处理能力，其中，发射单元（ISU）实现了圆形队列架构；执行单元（EXU）实现了可并行执行的架构；写回单元（WBU）设计了多提交端口。这种并行架构显著提升了神经元和突触处理能力，带宽和能效大幅提升。与比利时 Catholique de Louvain 大学的 ODIN 脉冲神经网络处理器相比，Polaris 23 的带宽提高了约 300 倍，在 MNIST 数据集上的准确率达到 91%[15]。

2.4.3 柔性可拉伸芯片架构

柔性可拉伸芯片架构通过材料创新与结构设计，使神经形态器件能够适应柔性、可穿戴场景的需求。首尔国立大学 Tae-Woo Lee 团队的综述系统总结了可拉伸突触晶体管在功能材料、制造工艺与新型结构设计方面的最新进展。在材料方面，综述详细分析了可拉伸基底、电极、半导体与介电层的材料体系，如 PVDF-HFP 离子凝胶、PEDOT: PSS 导电聚合物和 P3HT 类半导体，揭示了柔韧性与电学性能之间的平衡设计原则。在结构设计方面，可拉伸神经形态器件采用了垂直结构、波纹结构与纺织结构等新型架构，提升了器件应变容忍性和集成密度。这些可拉伸突触晶体管为可

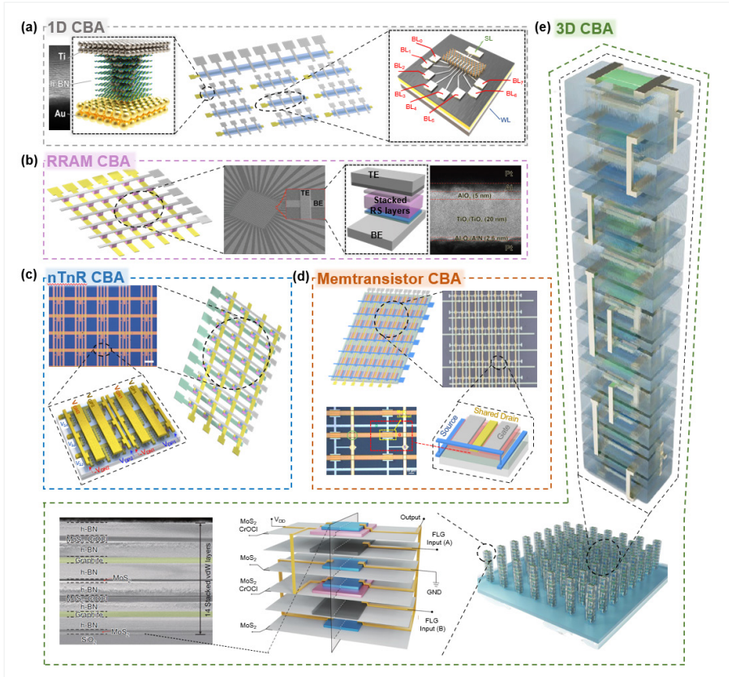


图 2-2. 基于不同忆阻单元集成的神经形态阵列及芯片架构分类

穿戴健康监测、神经假体及软体机器人神经系统等领域的应用提供了广阔前景，实现了“感知—计算—反馈”闭环功能 [16]。

除了上述几种架构，当前主流架构还包括如图 2-2 所示的基于交叉阵列（crossbar array, CBA）的多种集成架构，如多个字线共享一个位线的一维 CBA（1D CBA）架构，多个位线和多个字线相互交叉的阻变随机存储器 CBA（RRAM CBA）架构，在单个忆阻单元内同时集成存储器和晶体管的晶体管 - 存储器 CBA（nTnR CBA）架构，多个忆阻单元垂直堆叠的三维 CBA（3D CBA）架构等。

2.5 多领域应用展望

2.5.1 智能诊断与健康监测

神经形态芯片的多模态感知与边缘处理能力使其在智能医疗诊断与健康监测中具有独特优势，实时心脏疾病诊断是神经形态芯片的成功应用案例。有机电化学突触晶体管被应用于心电图信号的高保真记录和存储，以及光电容积描记信号的神经形态计算，进行活动分类。这种本地化处理避免了数据上传云端的时间延迟与隐私风险，为患者提供了更安全、更及时的诊断方案 [10]。前述国立阳明交通大学团队开发的光电突触元件在智慧型医疗诊断中展现出潜力。该技术未来可推展至智慧型医疗诊断、自驾车视觉模组、穿戴式感知装置及仿生机器人等领域，促进人工智能与感测科技的融合发展。特别是在医疗诊断中，这种元件的高光响应度和稳健的学习能力，可用于处理复杂的医学图像，提高诊断的准确性和效率。

2.5.2 仿生感知与智能假肢

基于神经形态芯片开发的仿生感知系统通过模拟生物感官的信息处理机制，为智能假肢与机器人提供更自然的交互能力。中科院苏州纳米所开发的视网膜启发神经形态计算系统通过光学混合编程，实现了对不同复杂度视觉任务的自适应处理。这种系统能够模拟从初级视觉皮层到高级视觉中枢的层级化信息处理机制，为智能假肢的视觉反馈系统提供了技术支持。类似原理可以应用于仿生触觉系统，通过模拟皮肤感受机制，增强智能假肢的触觉感知能力。可拉伸突触晶体管则为智能柔性电子的发展带来了新的可能，它不仅让电子器件具备类似神经的学习与响应能力，也为可穿戴设备、神经修复和软体机器人提供了更贴近生物特性的解决方案。这些可拉伸器件能够与皮肤、纤维、软体机器人等非平面表面形成紧密界面，实现更自然的人机交互。

2.6 总结

本章节系统综述了神经形态器件与芯片的材料体系、器件结构、芯片架构及多领域应用。在材料方面，金属氧化物、低维材料、有机半导体及其异质结体系已成为实现高性能神经形态器件的重要基础。在器件结构层面，从简单的单一功能层到复杂的多功能层堆叠与多材料异质结构，设计灵活性不断增强。在芯片架构方面，感存算一体、并行处理及柔性可拉伸技术正推动神经形态计算向更高能效、更高集成度方向发展。

3. 高灵敏度柔性可穿戴射频传感器在血糖探测中的应用

3.1 射频芯片传感技术在血糖探测的探索

健康的生活可以通过监测人体的心率、血压等来保证，而这些需要定期检查才能及早诊断疾病。糖尿病每年影响着包括中国在内的全球 5.89 亿人，约占成年人口的 6% 至 8%。随着社会的发展，诊断方法和设备也随之改进。例如，采指尖血检已被淘汰，因为使用尖锐物体采集一小滴血液可能会引发感染风险，而且反复采血可能会对手指组织造成永久性损伤。此外，患有血友病等基础疾病的患者无法经常通过扎手指来控制糖尿病。考虑到这些现实情况，人们很容易理解非侵入性血糖监测技术的优势。即使是微创技术也正在开发中，以克服感染问题，并且使用寿命较短（几天到最多 90 天）。非侵入式血糖测量是一种重要的方法，它避免了刺痛的体验、感染风险和手指组织损伤，甚至可以提供连续测量。目前，已有多种方法可用于非侵入性测量血糖水平，但大多数现有的非侵入性方法在测量准确性方面存在各种问题。

利用电磁波 (EM) 测量血糖水平是最突出的候选方法之一，这种基于射频 (RF) 的电磁波传感方法最近因其潜力以

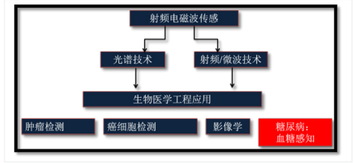


图 3-1. 射频电磁波传感及应用

及在开发成功的血糖监测仪方面取得的突破而备受关注。用于血糖监测的射频传感依赖于电磁波和生物组织之间的相互作用，主要是通过改变它们的介电特性来实现的。血液中的葡萄糖分子改变间质或血液组织的介电常数（ε）和电导率（σ），当射频信号传播或从这些组织反射时，信号的幅度、相位或共振频率会根据葡萄糖浓度而变化，在基于谐振的传感器中，传感器包括谐振器（例如，微带贴片、开口环谐振器、共面波导）、谐振频率（f_0）和 S 参数（如反射系数 S_{11}）对附近组织的介电特性很敏感，当葡萄糖浓度发生变化时，组织的有效介电常数会发生变化，从而导致谐振频率发生变化或 S 参数的幅度发生变化。信号衰减和相移取决于组织的介电损耗角正切（tanδ），而该值随葡萄糖浓度的变

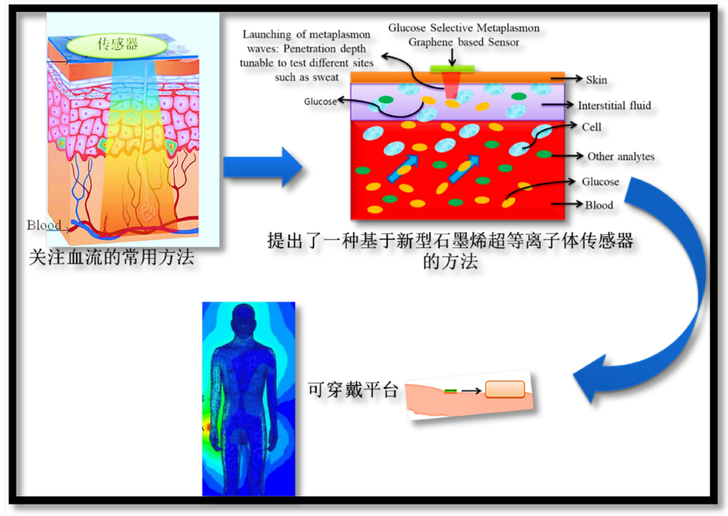


图 3-2. 方法论和机制

化而变化。然而，这种方法仍需进一步发展，并面临挑战。在使用射频电磁波传感技术进行血糖监测时，每位研究人员面临的主要问题之一是选择性 / 特异性低。灵敏度当然是与选择性一起需要解决的另一个主要问题。目前，市面上的传感器灵敏度普遍较低，无法有效测量血糖水平，而且它们对血糖的特异性也不够。此外，现有的传感器存在信噪比低、容差低、辐射损耗大、易受大气因素影响等问题。

使用石墨烯和 MXenes 等先进材料可以有效解决基于射频的可穿戴葡萄糖传感的挑战，例如灵敏度低、皮肤接触不良和环境干扰。它们优异的导电性、大的表面积和可调的表面化学性质，能够增强电磁耦合，并对葡萄糖引起的组织介电常数变化具有更高的介电敏感性。石墨烯的柔韧性和生物相容性确保与皮肤更好地保形接触，减少信号损失，而 MXenes 的亲水性和丰富的表面末端（-OH、-O、-F）有助于稳定的界面和改善的电荷转移。通过将这些材料集成到柔性射频谐振器或天线中，传感器可以在弯曲或出汗的情况下实现更强的场限制、更低的噪音和更高的响应稳定性，从而实现更可靠、连续和非侵入性的血糖监测。柔性轻质基板以及低功耗蓝牙 (BLE) 或 NFC 等无线数据传输技术的使用，进一步提升了便携性。此外，石墨烯和 MXene 等节能材料可以通过提高信号灵敏度来帮助降低功耗，从而实现自供电或电池高效的可穿戴传感器，适用于便携式医疗应用中的持续实时血糖监测。

此外，由于需要紧凑、低功耗和用户友好的设计，便携性仍然是基于射频的可穿戴血糖传感系统面临的一项关键挑战。传统的射频测量装置通常依赖于体积庞大的仪器，例如矢量网络分析仪或外部电源，这限制了它们在日常生活中的实际应用。为了克服这一问题，目前的研究重点是小型化、低功耗射频电路和片上系统 (SoC) 集成，以便在小型可穿戴模块内执行信号生成、检测和数据处理。

3.2 新型非酶葡萄糖电化学传感器

我们与辽宁科技大学化学工程学院顾婷婷团队共同开发了一种新型非酶葡萄糖电化学传感器，这种非酶葡萄糖电化学传感器基于铜 - 半胱胺（Cu-Cy）修饰电极的生物相容性实现了高灵敏度。该传感器利用天然聚合物壳聚糖（CTS）将催化活性材料 Cu-Cy 固定在电极表面，通过电化学阻抗谱（EIS）、循环伏安法（CV）和恒定电位安培法对 Cu-Cy/CTS 修饰电极进行电化学表征和葡萄糖响应研究 [17]。

在碱性环境中，Cu-Cy 对葡萄糖的氧化具有显著的电催化活性。研究团队还探讨了影响传感器响应的几个关键参数，包括电极活化的扫描周期数、应用电位以及 Cu-Cy 和 CTS 的含量。获得了电化学传感器对葡萄糖检测的两个线性范围（2.7 μM 至 1.3 mM 和 1.3 mM 至 7.7 mM），具有高灵敏度（588.28 和 124.42 μA · mM-1 · cm-2）、良好的选择性和稳定性。此外，研究团队还开发了基于 Cu-Cy/CTS 修饰的屏幕印刷电极（SPE），用于便携式设备直接检测实际样品中的葡萄糖。

新型传感器不仅因其生物相容性、成本效益、灵敏度、选择性、易用性和对分析物的快速响应而备受关注，还极大地促进了未来电化学传感器和生物传感器的长期发展，通过与芯片学院的合作，这一研究为医疗健康监测芯片的开发提供了重要的材料基础。通过非酶催化机制，该研究降低了对昂贵酶制剂的依赖，有助于降低芯片制造成本并提高产品稳定性。此外，研究中的电化学传感器技术和便携式检测设备开发经验，指导了设计微型化、便携式或可穿戴的芯片设备的后续发展，这些设备可用于现场快速检测。同时，该研究展示了材料科学、纳米技术和跨学科合作在芯片研发中的重要性，为芯片技术的发展提供了多方面的启发和帮助，为相关领域的研究和应用开辟了新的道路 [18, 19]。

4. 无源射频传感器芯片在医疗保健领域感知与检测的应用

4.1. 引言

医疗技术的进步正朝着连续、实时和远程健康监测的方向发展，以实现预防性和个性化护理。传统的生物传感器依赖电线或电池，限制了使用寿命，增加了维护成本，并对植入物构成安全风险。无电池射频芯片传感器通过无线地从外部射频源采集能量并通过反向散射信号传输数据，克服了这些问题，从而消除了对板载电源的需求。

无源射频芯片传感器因其能够在无需持续电源或维护的情况下监测关键健康参数，在医疗保健领域迅速受到关注。这些传感器依靠来自外部阅读器的射频能量来运行，并通过反向散射信号进行通信，并基于谐波信号生成获得了高灵敏度、更好的抗噪声能力，同时减轻了周围环境干扰。该技术能够对温度、血压、葡萄糖浓度和组织状况等生理变量进行无创、无线和连续监测。本章节介绍了无源谐波射频芯片传感器在医疗保健系统中的工作原理、设计方法和潜在应用，还讨论了与组织衰减、生物相容性、读取范围和数据集成相关的主要挑战，以及可能克服这些限制的潜在工程解决方案。该研究中基于射频芯片的无源谐波传感平台，可以作为下一代智能医疗和医疗物联网的基础。

这类传感器基于 RFID 原理运行，并针对生物医学传感进行了定制。它们将部分入射射频能量转换为电能，而温度或葡萄糖水平等生理变化会改变传感器的阻抗或电容，从而改变反射信号。谐波射频传感器通过传输谐波频率进一步提高了性能，减少了基波和外部反射的干扰——这在复杂的生物环境中是一个优势。集成微型射频芯片、紧凑型天线和生物相容性材料，使得可靠、免维护的可穿戴和可植入设备成为可能。它们

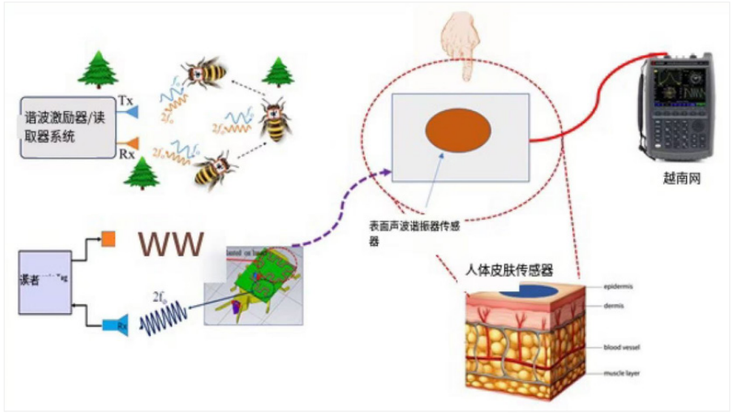


图 4-1. 用于传感和无接触葡萄糖监测的无源谐波雷达系统

的无电池操作和低功耗兼容性使其成为医疗物联网的理想选择，支持长期远程医疗监测。图 1 显示了用于位置检测以及无创葡萄糖监测系统的无电池射频传感器。

射频芯片传感器系统集成了几个关键组件，以实现无线、无源条件下的传感功能。该系统以射频芯片作为核心元件，负责能量采集、参数传感和数据通信功能。射频芯片可将接收到的射频能量转换为直流电源信号并传输到传感器接口，同时它还能够调制反向散射的谐波信号以供传输。

为实现高效运行，该系统依赖于结构紧凑的宽带天线，例如微带贴片天线、螺旋天线或基于基片集成波导的天线，这些天线专为医疗频段设计（如 900 MHz、2.45 GHz 和 5.8 GHz），能够在考虑人体邻近效应、阻抗匹配和辐射效率的条件下，实现最优的功率接收与谐波辐射性能。谐波生成电路则利用如肖特基二极管、变容二极管或 FET 等非线性元件，产生携带有传感信息的高次谐波，从而有效降低直接反射的干扰。此外，系统还集成有功能化传感层，通常采用聚合物、石墨烯或金属氧化物等材料。当环境中诸如温度、葡萄糖浓度、湿度或 pH 值等参数发生变化时，这些材料的电学特性会相应改变，进而引起谐波响应产生可检测的变化，实现对外界物理或化学量的无线感知。

4.3. 挑战与可能的解决方案

在医疗保健领域，无源射频芯片传感器的应用面临若干挑战。首先，生物组织含水量高导致的信号损耗，可以通过使用较低频率的 ISM 频段、优化天线布局以及引入超材料结构设计予以缓解。其次，受限于无源供电模式，其通信距离通常较为有限，该问题可以通过更高增益的天线、采用谐波检测技术以及混合能量收集等方案来改善。第三，为了确保生物相容性和长期体内耐久性，可以采用如 PDMS 或聚对二甲苯 -C 等惰性涂层进行封装。此外，系统易受环境干扰与噪声影响，通过谐波频率分离与自适应滤波技术进行抑制。在微型化方面，尺寸缩减可能引致效率下降，为此需借助高 Q 值天线设计和 CMOS 集成工艺加以平衡。最后，为保障无线医疗数据的安全传输，必须集成加密算法与安全通信协议。表 1 系统总结了射频芯片传感器中的各种挑战以及相应的潜在解决方案。

4.4 未来展望

无源谐波射频芯片传感器正逐步革新着医疗保健领域，该技术无需电池或导线，即可实现对关键生理参数的连续、无线和免维护感知。其工作原理在于从外部射频信号中采集能量，并利用谐波反向散射调制技术进行数据传输。相较于传统传感机制，该方法在生物体内表现出更高的检测灵敏度、更强的抗干扰能力以及更优的信号可靠性。得益于其结构紧凑与生物相容性良好等特点，该类传感器可集成到可穿戴或可植入系统中，用于监测温度、葡萄糖和压力等多种生理指标。尽管该技术在实际应用中仍面临组织信号衰减、传输距离有限以及材料长期稳定性等挑战，但天线微型化、超材料应用和混合能量采集等，技术的进步正持续推动其性能提升，未来的研究方向将侧重于柔性材料开发、多参数传感融合以及将其安全融入医疗物联网和人工智能辅助诊断系统。随着材料科技和射频设计的持续突破，无源谐波射频芯片传感器有望在个性化医疗保健中发挥日益重要的作用，为实现实时、无源化和智能化健康监测提供关键技术支撑。

表 1：射频传感应用中的挑战与可能的解决方案

序号	挑战	描述	建议的解决方案
1	生物介质中的信号损耗	人体组织中的高含水量导致射频信号强烈衰减。	使用较低频率的 ISM 频段（例如 900 MHz），优化天线布局，并采用超材料天线设计以改善穿透性。
2	有限的通信范围	无源操作减少了可用于传输的功率。	提高天线增益，使用谐波检测以获得更好的信噪比，并采用混合射频能量收集电路。
3	生物相容性与耐久性	与生物组织的长期接触可能导致腐蚀或炎症。	利用惰性涂层（如 PDMS 或聚对二甲苯 -C）并进行表面功能化以提高稳定性。
4	干扰与噪声	反射和电磁干扰可能扭曲反向散射信号。	实施谐波频率分离、自适应滤波和信号调制技术以抑制噪声。
5	微型化与集成	减小尺寸可能影响天线效率和芯片性能。	使用 SIW 或分形结构设计紧凑的高 Q 值天线，并通过先进 CMOS 工艺集成多功能芯片。
6	数据安全与隐私	无线医疗数据容易受到未经授权的访问。	在射频链路中应用安全通信协议、加密和认证。

5. 用于生物医学信号检测的超灵敏磁电 MEMS 传感器

5.1. 背景

在医学检测领域，实现对源自心脏、大脑等部位的生物医学信号进行高精度、非接触式且无创的测量，一直是测量设备发展的重要目标。此类信号通常表现为器官或组织产生的电势或磁通量的变化，与电信号相比，周围生物组织和器官周围对磁信号的影响较小，使其在体内传导更为均匀，因而具有更高的空间分辨率。脑磁图（MEG）作为目前广泛应用的脑功能记录技术，通过测量大脑神经活动所产生的微弱磁场来实现对脑功能的非侵入式成像。与脑电图（EEG）相比，MEG 不受颅骨和大脑周围其他组织导电性差异的影响，从而为神经活动研究提供了更为清晰的信号来源。然而，当前主流 MEG 系统所依赖的超导量子干涉装置（SQUID）磁强计需要在低温条件下运行，且依赖于昂贵、固定的基础设施，限制了其广泛应用。在此背景下，可在室温环境下工作的超灵敏纳米级磁传感器有望从根本上改变神经磁信号的记录范式。此类传感器若进一步集成为纳米尺度下的阵列，并制成神经探针，将能够在单个神经元水平上解析神经动态，为理解大脑功能提供全新的观测视角。

近年来，基于磁电（ME）复合材料的微机电系统（MEMS）传感器因其可在室温下工作并具备检测弱磁场的能力，

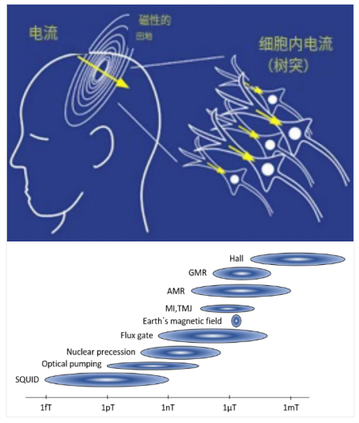


图 5-1. MEG 和 EEG 的工作机制和不同磁传感机制的测量范围

在无创生物磁测量、穿透成像和跟踪通信等应用中展现出巨大潜力。在脑磁图（MEG）等应用中，磁场传感器需能够检测直流或低频（<10Hz）范围内强度为皮特斯拉量级的极弱磁场。传统上广

泛采用的基于超导量子干涉仪（SQUID）的低场磁强计依赖于昂贵的低温冷却系统和磁屏蔽室，限制了其普及与灵活性。相比之下，MEMS 传感器具有以下显著优势：首先，磁电效应在室温下即可实现高灵敏度，无需复杂冷却装置；其次，ME MEMS 传感器尺寸微小，易于集成为柔性传感器阵列以适应不同诊断场景下的形变需求，有助于提升信号源定位精度；此外，MEMS 传感器可采用晶圆级封装技术实现真空封装，有效隔离外界环境干扰，并增强器件在操作过程中的机械与功能稳定性。

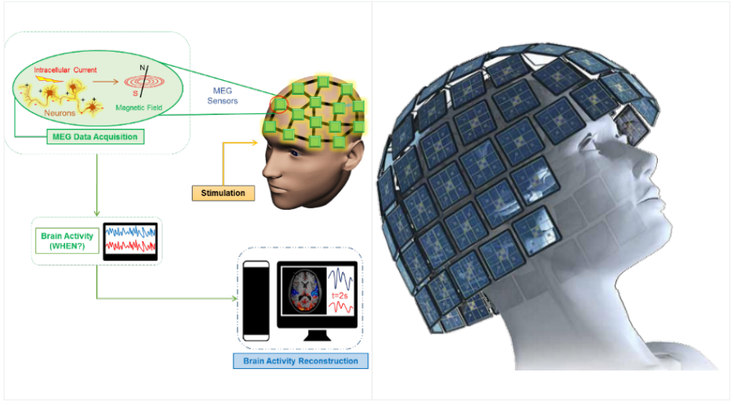


图 5-2. 脑磁图 MEG 技术工作流程及装置示意图

5.2. 脑磁图（MEG）

MEG 是一种非侵入性神经生理成像技术，通过检测大脑神经元活动产生的微弱磁场，实现对脑功能的记录与分析。该技术基于磁场空间分布特征定位大脑内的活动源，并将活动源的位置信息与磁共振成像（MRI）等结构图像融合，从而提供兼具解剖结构与神经功能的高时空分辨率信息。

在技术实现层面，MEG 依赖于对脑内神经电活动所产生极弱磁场的探测能力，这些信号通常由贴近头皮的超导量子干涉设备（SQUID）阵列进行检测。SQUID 具备极高的磁灵敏度，可以检测到强度低于地球磁场十亿分之一的磁信号，并将这些信号转换为可记录的电压输出。SQUID 阵列通常集成于与头部形状匹配的专用头盔中，并在液氦低温环境下工作以维持状态。所记录的神经元信号类型多样，涵盖持续时间约毫秒级的动作电位、持续数十到数百毫秒的突触后电位事件，以及以秒为单位的脑节律调制事件。

在临床应用方面，MEG 主要用于癫痫灶的定位及术前功能区测绘，为神经外科手术提供关键功能导航。研究人员使用该技术持续为理解自闭症、阅读障碍等发育性障碍的神经机制提供新证据，同时在抑郁症、双相情感障碍、精神分裂症等精神疾病的脑网络研究中发挥重要作用。近年来，其在阿尔茨海默病等神经退行性病变研究中的应用也日益广泛。

MEG 技术在脑机接口（BCI）领域同样具有明确的应用前景，主要体现在基于脑信号解码的设备控制、辅助技术开发以及神经康复系统的构建。其高时间分辨率与源定位能力为精细控制外部装置提供了可靠的信号基础。展望未来，对于基于 MEG 构建的 BCI 系统，其发展将重点围绕三个方向推进：一是开发更先进的信号处理和分析算法以提升信号解码效率与系统稳健性；二是推动 MEG 与脑电图（EEG）、功能性近红外光谱（fNIRS）等多模态神经影像技术的集成与融合；三是研究更为便携、用户友好的 MEG 设备及系统，从而扩展其应用场景与适用人群范围。

5.3. 传感器设备在脑磁图（MEG）中的重要性

在 MEG 系统中，神经元电流（主要来自皮层中的锥体细胞）产生的磁场可传导至头部外部空间。与 EEG 需直接接触头皮不同，MEG 传感器能够非接触式地捕获这些磁场信号。传感器的性能参数，尤其是其灵敏度与信噪比，直接决定了脑活动定位和分析的准确程度。因此，磁场传感单元作为 MEG 系统的核心部件，对于整个生物医学成像技术的性能具有决定性影响。MEG 所监测的是大脑神经元电活动产生的极微弱磁场，其强度通常在飞特斯拉 10^{-}-15 T 量级。

传统 MEG 系统普遍采用 SQUID 作为传感单元，该类传感器虽具备极高的磁场灵敏度，但须在极低温度下运行（约 -269° C，使用液氦），并需配备复杂低温冷却与维持系统，导致设备体积庞大，运行成本高昂。在此背景下，具备超高灵敏度的磁电（ME）微机电系统（MEMS）传感器被视为下一代 MEG 技术的核心发展方向。该类传感器的性能将直接决定未来 MEG 系统的探测灵敏度、空间分辨率以及系统可靠性，若无先进的传感器技术支持，MEG 将难以有效捕捉反映大脑实时功能的微弱磁信号，进而制约其在神经科学及临床诊断中的深入应用。

5.4. 相关研究思路与方案设计

拟议项目计划旨在系统评估磁电（ME）传感器在生物磁相关频段内协同探测性能，并推动其探测极限的突破。研究将分为三个阶段有序推进。

第一阶段将聚焦于多层磁电复合材料的设计、合成与制备，重点优化其磁电耦合系数与界面特性，以获得具有高耦合效率的功能材料。

第二阶段将引入微 / 纳机电系统（MEMS/NEMS）技术实现传感器件的精密制造，以检测源自心脏、外周神经、深部脑区及磁性标记细胞等生物目标的弱磁信号。

第三阶段将致力于拓展材料和器件在多种生物医学信号检测中的应用，重点解决多源磁噪声的交叉敏感问题，最终实现无需磁屏蔽的生物磁测量。在此基础上，进一步发展可穿戴 / 柔性传感阵列系统，并探索测量数据实时处理与执行器驱动的一体化集成策略。

这项研究还将探索新型的 MEMS/NEMS 谐振器在直流 / 交流电磁场检测方面的效能。当前多数磁电传感器受限于低频响应与有限灵敏度，尤其不适用于直流磁场探测。传统传感器亦存在体积大、机电性能不足、磁致伸缩耦合弱及功率耐受能力低等瓶颈。预计本研究提出的原创方法，将实现磁电耦合效率与谐振调谐范围的量级提升。

5.5. 科学创新性与影响

本章节研究的科学创新性体现在材料合成与器件制备方面。其一是混合多铁性复合材料的创新。通过分析外延铁磁薄膜与压电薄膜在外磁场中的电压 / 电流响应，揭示其应变耦合机制。研究目标为实现磁可调机电共振频率并保持低噪声水平，从而为设计新一代磁电（ME）传感器开辟新路径。与传统的磁场可调组件相比，该方案在能效提升、噪声抑制和集成度方面具有显著优势。关键创新在于直接在磁致伸缩层上获得高质量压电薄膜以最大化磁电耦合效应，并发展一种突破性的原位高分辨透射电镜（HR-TEM）方法用于动态表征铁磁 - 压电异质界面处的应变演化行为。其二是用于生物磁信号检测的超灵敏磁电 MEMS 传感器的创新。本研究将致力于开发基于压电纳米板的 MEMS/NEMS 谐振器件，旨在应对物理、化学和生物传感中的高灵敏度检测挑战，并同步实现高 Q 值、可重构和自适应的射频（RF）谐振器件的制备。关键创新路径包括采用微纳加工技术制备自支撑薄膜结构以增强 ME 效应、系统研究体积效应对 ME 复合材料性能的影响，并发展高精度的片上射频 / 微波测量技术。

上述研究内容相辅相成，共同构成一个系统而前瞻的研究体系，处于当前国际学术研究的前沿。本项拟议工作具有鲜明的实验性与高度多学科交叉特征，融合了磁学、压电材料学、生物电子学与微纳系统技术等多个领域的先进方法。

6. 结论

本综述系统性梳理了当前面向“大健康”场景开展的“芯片 + 传感”融合式研究，涵盖生物体液微流控监测、感存算一体化神经形态芯片、射频 / 无源谐波葡萄糖传感及磁电 MEMS 脑磁图四个关键技术方向，构建了从材料、器件、芯片到系统与应用的完整技术链条。柔性可穿戴微流控芯片实现了对汗液流速及多标志物浓度的实时无创监测，电导、电容与热学等多物理机制的协同感知提升了检测极限、稳定性和佩戴舒适性；基于抗体、分子印迹聚合物与适配体的识别单元，则支撑了从单目标到多模态传感阵列的灵活扩展，为慢病居家管理提供了可行路径。神经形态芯片在材料体系、结构设计与系统架构方面取得显著进展。金属氧化物、低维量子材料与有机混合离子 - 电子导体实现了多维度的神经形态突触可塑性；感存算一体、可重构并行与柔性拉伸架构将静态功耗降至 fJ 级别，并已成功应用于心电实时诊断、视网膜仿生视觉及智能假肢感知 - 反馈闭环系统，为极低功耗边缘智能医疗奠定了硬件基础。射频与无源谐波传感技术为无创血糖监测提供了新路径。石墨烯 /MXene 等高导电界面结合柔性谐振结构显著增强了介电灵敏度与信噪比；基于谐波反向散射机制在无源条件下实现了超过 1 米的读取距离，具备良好的多参数扩展能力，有效克服了传统电化学传感器寿命短与舒适性差的局限。超灵敏磁电 MEMS 传感器实现了室温下 10^{-12} T 级低频磁信号的检测，有望替代依赖低温环境的 SQUID 系统；通过多层磁电异质结与 NEMS 谐振器的协同优化，磁 - 机 - 电耦合系数提升一个量级，在脑磁图、心磁图及神经接口中展现出高空间分辨率成像潜力，为发展便携式、可穿戴脑机接口提供了核心器件支撑。综上所述，芯片传感技术已超越单一检测功能，向多模态融合、超低功耗、无源化与智能化方向演进。在材料创新、微纳制造与人工智能算法深度融合的推动下，逐步形成覆盖预防、诊断、干预与康复全流程的集成解决方案。未来应重点突破生物相容性封装、临床标准建立、数据安全机制及跨学科人才培育等关键环节，以推动该技术在个性化医疗、智慧养老及远程健康监护中的规模化应用，服务于“健康中国”战略目标的实现。

致谢

本文作者感谢：国家科学基金（62204210）、江苏省自然科学基金（BK20220284）、西交利物浦科研发展基金 (RDF-21-01-027, RDF-24-01-037)、西交利物浦教育发展基金（TDF2324-R27-221）、江苏省教育厅专项基金 (EFP10120240023, EFP10120240024 and EFP10120240025)。

参考文献

[1] G. Liu et al., "A wearable conductivity sensor for wireless real-time sweat monitoring," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 227, pp. 35-42, 2016.

[2] D.-H. Choi, M. Gonzales, G. B. Kitchen, D.-T. Phan, and P. C. Searson, "A capacitive sweat rate sensor for continuous and real-time monitoring of sweat loss," ACS sensors, vol. 5, no. 12, pp. 3821-3826, 2020.

[3] K. Kwon et al., "An on-skin platform for wireless monitoring of flow rate, cumulative loss and temperature of sweat in real time," Nature Electronics, vol. 4, no. 4, pp. 302-312, 2021.

[4] A. Aggarwal, M. Dautta, L. F. Ayala-Cardona, A. Wudaru, and A. Javey, "Wearable Humidity Sensor for Continuous Sweat Rate Monitoring," Advanced Materials Technologies, vol. 8, no. 17, p. 2300385, 2023, doi: https://doi.org/10.1002/admt.202300385.

[5] V. Krivitsky, M. Zverzhinetsky, and F. Patolsky, "Antigen-dissociation from antibody-modified nanotransistor sensor arrays as a direct biomarker detection method in unprocessed biosamples," Nano letters, vol. 16, no. 10, pp. 6272-6281, 2016.

[6] J. G. Pacheco, M. S. Silva, M. Freitas, H. P. Nouws, and C. Delerue-Matos, "Molecularly imprinted electrochemical sensor for the point-of-care detection of a breast cancer biomarker (CA 15-3)," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 256, pp. 905-912, 2018.

[7] J. Wang et al., "SERS-Based Aptamer Sensing Strategy for Diabetes Biomarker Detection," Analytical Chemistry, vol. 96, no. 50, pp. 20082-20089, 2024/12/17 2024, doi: 10.1021/acs.analchem.4c05036.

[8] J. L. Chen, T. C. Chiang, and P. T. Liu, "All-Metal-Oxide Heterojunction Optoelectronic Synapses with Multilevel Memory for Artificial Visual Perception Applications," Small, vol. 21, no. 25, p. e2502271, Jun 2025, doi: 10.1002/smll.202502271.

[9] J. Yao et al., "Gate-Tunable Highly Linear Bipolar Photoresponse in Se@SWCNT Adaptive Neurons for Dynamically Programmable Neuromorphic Computing," Advanced Materials, vol. 8, p. e06367, Aug 4 2025, doi: 10.1002/adma.202506367.

[10] W. Shan, Y. Wang, Y. Zhong, S. Wustoni, and S. Inal, "Organic Electrochemical Synaptic Transistors with Improved Retention for Logic and Biosignal Processing," Advanced Materials, vol. 10, p. e13703, Oct 14 2025, doi: 10.1002/adma.202513703.

[11] Z. Shen et al., "Effect of Annealing Temperature for Ni/AlOx/Pt RRAM Devices Fabricated with Solution-Based Dielectric," Micromachines (Basel), vol. 10, no. 7, p. 446, Jul 2 2019, doi: 10.3390/mi10070446.

[12] Z. Shen et al., "Artificial Synaptic Performance with Learning Behavior for Memristor Fabricated with Stacked Solution-Processed Switching Layers," ACS Applied Electronic Materials, vol. 3, no. 3, pp. 1288-1300, 2021, doi: 10.1021/acsaelm.0c01094.

[13] T. Zhao et al., "Bio - Inspired Photoelectric Artificial Synapse based on Two - Dimensional Ti3C2Tx MXenes Floating Gate," Advanced Functional Materials, vol. 31, no. 45, p. 2106000, 2021, doi: 10.1002/adfm.202106000.

[14] Z. Shen et al., "Full - vdW Heterosynaptic Memtransistor with the Ferroelectric Inserted Functional Layer and its Neuromorphic Applications," Advanced Functional Materials, vol. 35, no. 2, p. 2412832, 2024, doi: 10.1002/adfm.202412832.

[15] J. Zong, J. Wang, G. Li, R. Wu, and D. Zhao, "Polaris 23: a high throughput neuromorphic processing element by RISC-V customized instruction extension for spiking neural network (RV-SNN 2.0) and SIMD-style implementation of LIF model with backpropagation STDP," The Journal of Supercomputing, vol. 81, no. 2, p. 398, 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06826-y.

[16] T. Long, C. Kim, Y. Zhao, and T.-W. Lee, "Manufacturing strategies for stretchable synaptic transistors," Wearable Electronics, vol. 2, pp. 259-269, 2025, doi: 10.1016/j.wees.2025.07.001.

[17] H. Chen et al., "A Biocompatible, Highly Sensitive, and Non-Enzymatic Glucose Electrochemical Sensor Based on a Copper-Cysteamine (Cu-Cy)/Chitosan-Modified Electrode," Nanomaterials (Basel), vol. 14, no. 17, p. 1430, Aug 31 2024, doi: 10.3390/nano14171430.

[18] A. Kandwal, L. W. Y. Liu, M. J. Deen, R. Jasrotia, B. K. Kanaujia, and Z. Nie, "Electromagnetic Wave Sensors for Noninvasive Blood Glucose Monitoring: Review and Recent Developments," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, p. 8007215, 2023, doi: 10.1109/tim.2023.3327466.

[19] A. Kandwal et al., "A Novel Method of Using Bifilar Spiral Resonator for Designing Thin Robust Flexible Glucose Sensors," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, p. 8004810, 2021, doi: 10.1109/tim.2021.3115201.

半导体视界
Semiconductor Horizons

芯界语录



在不确定的时代背景下推动半导体这一关键领域的创新发展，需要各国共同打造自由贸易环境、全产业链“相互依存”协同发展。

——约翰·纽菲尔（美国半导体行业协会总裁兼 CEO ）



在人工智能时代，半导体技术是新 AI 能力和应用的关键推动力。AI 为人类生活和工作带来重大改变，也为半导体带来庞大商机。

——刘德音（台积电前董事长）



近两年半导体行业获得了极高的市场关注度，这是机遇也是挑战。短期内企业有很多方式能快速吸引市场的热钱和资源，但如果没有坚定的价值和信念去挑战更深更难的技术，这种表象上的活力是难以为继的。

——蒋渊（至纯科技董事长）



在新一代生态系统中，芯片产业是重中之重，拥有主芯片平台能力以及从 2G 到 5G 全景通信能力的企业才能真正成为生态承载者。

——楚庆（智识神工创始人兼董事长）



我们不应妄自菲薄，中国半导体产业是立足本土发展起来的，凭借着中国人的智慧与努力，在短短 30 年间走完了国外很多年的发展道路，这无疑是值得自豪的。只要我们整合好各方要素，中国芯片产业必将指日可待。

——魏少军（中国半导体行业协会集成电路设计分会理事长）

《半导体视界》通讯刊 ：会员服务与商务合作

为充分发挥中国国际科技促进会半导体产业发展分会（以下简称“分会”）在学术交流与产业资源整合方面的优势，助力半导体领域科技创新与产业化协同发展，分会正式推出《半导体视界》通讯刊。本刊致力于打造专业、权威的半导体领域科技交流平台、产业传播窗口与国际合作桥梁，全面服务分会会员单位及合作伙伴。

《半导体视界》作为分会旗下核心传播载体，聚焦半导体全产业链，重点报道分会及会员单位的重大科技成果、产业活动、政策解读与创新实践;同时关注国际半导体技术前沿、市场趋势、标准进展与供应链生态，提供深度行业分析与智库观点，推动分会内部乃至全球产业资源的高效对接与合作共赢。

为践行“全员办刊、共建共享”理念，现面向各会员单位及合作伙伴征集内容并开展多项合作：

一、通讯员机制

邀请各会员单位选派或推荐通讯员，负责收集、撰写并报送本单位重大新闻、技术突破与合作需求，通讯员将纳入本刊编委会联络体系。

二、内容征集范围

行业新闻:会员单位重大动态、产品发布、项目签约等；

技术论文：半导体设计、制造、封测、材料、设备等领域创新成果（附中英文摘要）；

政策与市场分析：产业政策解读、区域发展报告、国际市场趋势；

需求对接：技术攻关、成果转化、供应链合作、人才与资金需求。

三、商务合作项目

我们提供多种形式的商务合作机会，包括但不限于：

广告投放：封面、封底、内页广告，精准触达半导体产业链受众；

会议协办：联合举办技术论坛、供应链大会、国际交流会等品牌活动；

学术推广：企业技术白皮书发布、专家访谈、专题栏目定制；

专项服务：科技成果评价、“专精特新”企业培育计划、职业技能培训与等级认定、标准制定参与。

▶投稿请登录 ：https://www.svi-mag.com
（附 200 字中文摘要 + 500 字英文长摘要）

▶格式要求 ：

正文宋体 10.5pt / Times New Roman 11pt，1.2 倍行距，图表需提供矢量文件

▶审稿周期 ：

通讯稿 72 小时预审，学术类稿件 45 天内完成终审

▶版权说明 ：

录用文章需签署国际许可协议

欢迎各会员单位、行业机构及产业伙伴踊跃投稿、共建频道、拓展合作!

合作垂询：

联系人：潘菲

电话：15811215515

邮箱：semi2025@126.com

官网：https://www.svi-mag.com

聚力芯时代 智启新未来

中国国际科技促进会半导体产业发展分会
《半导体视界》编辑部

中国国际科技促进会团体会员单位分类及权利

一、普通会员单位享有下列权利：

- 颁发中国国际科技促进会“会员单位”证书；
- 享有本会的选举权、被选举权和表决权；
- 优惠或无偿获得本会提供的相关学术资料或信息服务；
- 可优先派代表参加本会及分支机构组织的国内外有关学术活动；
- 可获本会及分支机构给予技术咨询，协助举办培训班及国内外学术会议；
- 享有对本会工作的批评建议权和监督权。

二、高级会员单位享有下列权利：

- 颁发中国国际科技促进会“高级会员单位”证书；
- 享有本会的选举权、被选举权和表决权；
- 优惠或无偿获得本会提供的相关学术资料或信息服务；
- 可优先派代表参加本会及分支机构组织的国内外有关学术活动；
- 可获本会及分支机构给予技术咨询，协助举办培训班及国内外学术会议；
- 享有对本会工作的批评建议权和监督权；
- 可进行中国国际科技促进会每年大型活动的冠名，可牵头组织 “ 论坛”“展览会”等活动；
- 在中国国际科技促进会组织的各项培训中，优先采用企业的认证产品；
- 可牵头组织团体标准的制订。

三、理事单位：

- 颁发中国国际科技促进会“理事单位”证书；
- 享有本会的选举权、被选举权和表决权；
- 优惠或无偿获得本会提供的相关学术资料或信息服务；
- 可优先派代表参加本会及分支机构组织的国内外有关学术活动；
- 可获本会及分支机构给予技术咨询，协助举办培训班及国内外学术会议；
- 享有对本会工作的批评建议权和监督权；
- 可有偿进行中国国际科技促进会每年大型活动的冠名，可牵头组织 “论坛”、“展览会”等活动；
- 在中国国际科技促进会组织的各项培训中，优先采用企业的认证产品；
- 参与中国国际科技促进会的发展规划等工作；
- 第一时间获得科技最新政策信息，可参加中国国际科技促进会举办的各项技术交流活动，并在其它大型活动中享受优先权；
- 可牵头组织团体标准的制订；
- 享有被推选为理事的资格，可以用本会相应职位的身份参加对外交流等社会活动，并在活动中享有相应的待遇。

四、常务理事单位：

- 颁发中国国际科技促进会“常务理事单位”证书；
- 享有本会的选举权、被选举权和表决权；
- 优惠或无偿获得本会提供的相关学术资料或信息服务；
- 可优先派代表参加本会组织的国内外有关学术活动；
- 享有对本会工作的批评建议权和监督权；
- 可独立举办培训班及国内外学术会议；
- 可有偿进行中国国际科技促进会每年大型活动的冠名，可牵头组织“论坛”、“展览会”等活动；
- 在中国国际科技促进会组织的各项培训中，优先采用企业的认证产品；
- 参与中国国际科技促进会的发展规划等工作；
- 第一时间获得科技最新政策信息，可参加中国国际科技促进会举办的各项技术交流活动，并在其它大型活动中享受优先权；
- 可牵头组织团体标准的制订；
- 享有被推选为常务理事的资格，可以用本会相应职位的身份参加对外交流等社会活动，并在活动中享有相应的待遇；
- 参与中国国际科技促进会重大事务的决策管理工作。



★本刊部分图片由半导体分会 AI 自主生成，不涉及第三方版权问题

《半导体视界》杂志

国际标准刊号：ISSN 3093-8430

征订启事



聚力芯时代 智启新未来

联系人：潘菲　　电话：15811215515　　邮箱：semi2025@126.com