

超材料产业发展思考与建议

周济^{1*}, 张联盟²

(1. 清华大学材料学院, 北京 100084; 2. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘要: 超材料是由人工结构构成、具有自然材料所不具备的超常性质的人工材料, 有望获得与自然物质性质迥异的“新物质”, 为诸多应用领域提供了变革性技术支撑; 超材料的新原理、新功能实现处于爆发期, 相关产业链开始萌生, 而产业化、工程化进入瓶颈期, 超材料当前所处的特殊阶段恰是国家战略介入的机遇期。本文总结了超材料的概念演进过程, 从国际、国内两方面概要梳理了超材料的研究进展及发展趋势, 从产业化方向、产业链格局、产业发展策略三方面系统凝练了超材料的产业化进展。进一步辨识了超材料产业发展面临的挑战, 突出体现在制备技术、测试与表征技术、工程化技术、产业链、研发人才等方面, 从人工智能(AI)技术在超材料设计中的应用、超材料在AI技术演进中的应用两方面展望了AI技术为超材料产业带来的新发展机遇。为此建议, 以重点应用需求为牵引进行重大项目布局, 建设国家级超材料制备、大数据与设计平台, 组建国家级创新联合体并促进跨学科人才培养, 在中长期尺度上精准推进我国超材料产业高质量发展。

关键词: 超材料; 人工结构; 超常性质; 工程化; 制备; 人工智能

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A

Development of Metamaterial Industry in China: Analysis and Suggestions

Zhou Ji^{1*}, Zhang Lianmeng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: As a class of artificially structured material that exhibits extraordinary properties not available or not easily obtainable in nature, metamaterials provide transformative technologies for many application fields. Now the implementation of new principles and functions regarding metamaterials has entered an explosive period, and the industrial chain has entered a nascent stage; meanwhile, large-scale engineering of metamaterials has entered a bottleneck period. This study summarizes the conceptual evolution process of metamaterials, outlines the research progress and development trends of metamaterials from both international and domestic perspectives, and analyzes the industrialization progress of metamaterials from three aspects: industrialization direction, industrial chain pattern, and industrial development strategy. The challenges of the metamaterial industry, involving preparation technology, testing and characterization technology, engineering technology, industrial chain, and research and development personnel, are highlighted. The new development opportunities brought by AI to the metamaterial industry were discussed from two perspectives: application of artificial intelligence (AI) in metamaterial design and application of metamaterials in the evolution of AI. It is recommended to focus on key application needs for major project layout, establish a national platform for metamaterial preparation, big data, and design, form a national innovation consortium, and promote interdisciplinary talent cultivation, thereby accurately

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-04-06

通讯作者: *周济, 清华大学材料学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为信息功能材料; E-mail: zhouji@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“超材料与超构工程国家发展战略研究”(2023-XZ-68)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

promoting the high-quality development of China's metamaterial industry in the medium and long term.

Keywords: metamaterials; artificial structure; extraordinary properties; engineering; preparation; artificial intelligence

一、前言

超材料指由人工结构构成、具有超常性质的人工材料。在研究超材料的过程中形成了全新的材料构造方法,即设计人工功能单元,在不违背物理学基本规律的前提下,获得与自然物质性质迥异的“新物质”。诸多具有新奇特性的新型人工材料,为信息技术、能源技术、航空航天、生物医学工程等领域提供了变革性技术支撑,得到世界各国的广泛关注,被视为21世纪前10年的重大突破之一^[1]。

超材料发展历程接近30年,立足大量研究工作的积累,有关新原理、新功能的实现进入爆发期。超材料的工程应用开始起步,面临着较强劲的需求,相关产业链也进入萌生阶段。与产业化、工程化对应的超材料规模化制备则进入了瓶颈期。可以认为,超材料当前所处的特殊阶段恰是国家战略介入的机遇期。

我国已是超材料研究大国,在研究队伍规模、基础研究成果产出方面均位于国际前列。在此背景下,把握超材料产业化发展机遇,发挥新型举国体制的优越性,将超材料研究优势转化为未来的产业优势,推动我国尽快成为超材料产业强国,值得深入思考和前瞻探讨。为此,本文基于超材料研究现状及发展趋势分析,对超材料发展的宏观性走势提出一些预判,以为相关学术研究、产业转化实践等提供基本参考。

二、超材料的概念演进

“超材料”最初由美国得克萨斯大学奥斯汀分校的学者提出,用于描述自然界中不存在、人工制得、具有三维和周期性结构的复合材料^[2]。随着相关研究的不断推进,超材料的概念不断演进,拥有了更加宽泛、指导意义更强的内涵。①第一次演进起因于美国学者以实验方式验证了英国学者提出的基于人工谐振单元阵列的负折射现象。随后,这类完全通过人工结构单元实现、具有自然材料所不具备的超常电磁性质的人工材料称为超材料^[3]。②第二次演进起因于介质基电磁超材料的出现。

介质超材料尽管具有超材料的性质,但谐振性质不仅取决于人工结构,也与介质材料自身的电磁参数(如介电常数、磁导率)相关^[4-5]。自此,超材料不再强调超常电磁性质单纯来源于人工结构。③第三次演进源于众多的声学、力学(机械)、热学、量子超材料的出现。由此,超材料不再局限于电磁材料^[6-9]。④第四次演进源于超材料与常规材料融合后,产生了一系列可提高常规材料性能、通过超材料原理实现的人工材料。随后,超材料的范围不再限定于拥有自然材料不具备性质的材料^[10,11]。

当前,超材料不仅涵盖一大批由人工设计的性质及功能机制、由人工结构构成的材料,而且隐含材料研发的新范式,适用于面向功能需求的材料逆向设计与人工构筑。因此,超材料难以从组成、结构、功能、应用领域等方面归类于任何材料子类,只能作为一类特殊的材料单独进行分类。这是制定超材料行业发展战略的难点所在。基于方法论进行超材料定义,容易导致相关概念“泛化”,这种“泛化”对本学科发展是有利的,但直接加大了研究和制定行业发展战略的难度。例如,仅以超材料作为材料领域的一个方向进行定向支持,通常很难精准把握发展方向;只有通过重大应用需求的牵引,才可能“以点带面”地推动超材料的发展。

三、超材料的研究进展

(一) 国际研究现状及趋势

超材料自概念提出后,一直是基础研究的活跃前沿。应用超材料思想发展了众多颠覆经验及常识的新型材料性质,从早期的电磁波负折射、完美隐身、完美透镜,到后来的类量子效应、时变效应、光电直接转换、超常力学性质等^[12-15]。

电磁(光学)超材料是超材料研究最为活跃的方向。电磁超材料发轫于微波段,当前的研究热点集中在可见光、太赫兹、红外、极紫外等频率范围,包括动态可调及可重构超材料(如基于相变材料的辐射制冷、红外微波太赫兹吸波、人工单元耦合的Fano谐振),量子超材料(如石墨烯拓扑超导量子模拟、基于二维材料的光学调制、全光芯片计

算、超材料模拟轴子暗物质), 片上结构设计超材料(如电子学超材料、极紫外硅基直超表面、倾斜扰动结构的超表面), 多维复用技术超透镜(如多维光场多功能、局域共振微腔涡旋光、双曲超材料合成复频波、超表面偏振复用)。在开放系统的量子实际应用过程中, 同步出现了非厄米超材料、时间晶体等前沿研究方向。在应用基础研究层面, 正在拓展至深空/深海/深地探测、高定向电磁对抗、第六代移动通信(6G)、绿色能源等国民经济与国防建设领域^[16,17]。

声学超材料是在电磁超材料原理启发下向超材料声波调控功能的拓展, 通过亚波长尺度的结构单元设计, 突破自然材料的物理限制, 实现负等效质量密度、负模量等反常特性^[18]。近年来, 声学超材料在微尺度超声控制、逆向设计方法、声子物理模拟、声波负折射与隐身等方向上取得引人注目的进展, 在高端和国防装备领域具有广阔的应用前景。

在机械(力学)超材料方面, 通过各种机械微结构单元实现传统材料难以具备的超常力学特性等研究较活跃, 涉及负泊松比、负刚度、可调模量、轻质高强的超材料, 涵盖结构设计、性能预测、应用拓展、智能化发展^[19,20]。机械(力学)超材料研究正在从单一的力学性能拓展至多物理场耦合与智能响应, 相关设计范式的革新(如深度学习驱动)、跨学科应用的潜力(如航空航天、生物医疗)标志着材料科学朝着功能化、智能化方向迈进。

热学超材料作为通过人工微结构设计实现热流定向调控的新型功能材料, 可突破传统材料在热传导、对流、辐射方面的物理限制, 实现热隐身、热集中、热整流等功能, 成为超材料研究的另一重要方向。热学超材料在电子元器件热管理、辐射制冷、热能利用、红外隐身等方面表现出颠覆性应用的潜力, 受到更多的关注^[21]。

超材料成功解决了凝聚态物理研究中的一个重要难题(如何通过理论设计和模拟获得期望的材料性能), 已成为人工构筑新物理机制及系统的重要依托^[22,23]。超材料在量子体系(如人工规范场、拓扑量子系统、量子-经典对应)模拟, 拓扑物理与拓扑相变(如拓扑边界态、非厄米拓扑)模拟, 引力与宇宙学(如类时空弯曲、膨胀宇宙模型)模拟, 非平衡态统计物理系统(如活性物质动力学、热力学极限突破)模拟等方面正在发挥积极作用,

成为连接经典与量子物理、低维与高维理论、平衡与非平衡态体系的独特实验工具, 具有的“人工物理实验室”属性也将加速新物理理论的验证与技术创新。

近年来, 受基础研究积累和应用需求的驱动, 超材料研究呈现新变化: 从单纯地探究“新物质”或材料物理性质的新奇性转向由变革性技术牵引, 从新原理探索、新性能演示逐步转向新型器件构筑, 从单一性能的演示转向综合性能的优化以及材料可用性的拓展, 从构成简单、物理图像清晰的单元材料过渡到更具实用价值的多元材料体系, 从“基元-序构-性能”的正向设计路径、通过调整及优化参数来探索新的性能与应用, 转向基于人工智能(AI)技术从性能反推超材料基元及序构、进而一次性获得超材料。相关超材料研究热点的变化, 体现出从基础科学问题逐渐转向技术与应用问题的研究趋势。

(二) 我国的研究情况

我国超材料研究居于国际第一梯队, 如全球超材料领域发表的论文有近30%来自中国, 超材料领域的高影响论文逾半数来自中国。在超材料知识产权分布方面, 我国占全球专利申请量的1/3。尽管我国学者已是国际超材料研究的主导力量之一, 但超材料应用研究方面的表现仍不够突出。整体来看, 我国超材料研究具有如下特征。

研究领域不断拓展, 研究水平稳步提升。尽管在原始创新方面不占绝对优势, 但“后来居上”势头明显, 在超材料的多数方向上都有高水平的研究产出。其中, 国内学者在介质超材料、信息超材料、声学超材料等方面做出了具有国际影响的开拓性工作。

研究队伍规模壮大, 学科交叉趋于鲜明。我国超材料研究队伍规模较大, 分布在材料科学、物理学、化学、电子学、光学工程、机械工程、生物工程、航空航天等学科方向; 队伍年轻化特征显著, 未来发展潜力良好。

产业需求提升较快, 社会期望同步提高。超材料具有超越常规材料的性质, 可能衍生颠覆性技术, 社会上对超材料的了解更为深入。以航空航天、高端装备为代表的重点产业对超材料的应用需求进一步明晰, 而基础研究获得的成果在短期内尚

难以满足工程应用亟需。

“真问题”研究导向有待加强。超材料是人工设计的材料，相关研究的目的本应是探索新原理、构筑新功能、发展新应用。然而，当前的一些研究是在已提出原理及功能基础上的浅层次重复，既缺失新原理与新功能，也未能显现实际应用潜力。

技术发展瓶颈开始显现。有别于常规材料，超材料易设计而难实现，制备一直是相关研究的技术瓶颈环节。超材料制备需要采用精准的加工工艺，如光学超材料制备离不开极限微纳加工手段，而国内的制备加工条件与国际先进水平尚有距离，成为超材料发展的主要制约因素。

研究战略导向缺失。国内的超材料研究仍以自由探索为主，研究方向布局全面但重点不够突出，对涉及产业发展的关键问题重视不够，缺乏引导性的国家战略举措（如重大研发项目、国家级研究平台等）。及时介入更具产业导向性的国家战略需求极为迫切。

四、超材料的产业化进展

（一）超材料的产业化方向

尽管超材料在出现之初即呈现良好的产业应用前景，但在相当长的时间内产业化进展明显滞后于社会预期，一直没有形成规模较大的产业和量大面广的实际应用。近年来，全球范围内为数众多的超材料初创企业悄然出现，标志着超材料产业出现了快速发展势头。市场研究机构对超材料产业的预测趋于乐观，如2024—2029年全球超材料市场将从2.2亿美元增长到13.8亿美元^[24]。就当前的超材料产业看，体量最大的应用积聚在国防军工领域，增长最快的应用是（无线）通信领域，最具吸引力的应用位于光学领域。此外，生物医学、高端制备、能源工程等领域中的新材料产业化初见端倪。

1. 无线通信

超材料可用于制作各种高性能天线，获得更强的功能、更小的尺寸、更宽的设计自由度、更好的可重构性。例如，基于超材料的小型化雷达在自动驾驶、智能交通等方面应用前景广阔；智能超表面是可以实时调整无源反射元件的吸收、反射、折射、相位，进而将入射电磁信号引导到所需方向的新型超材料器件，在6G应用上被寄予厚望；基于

超材料的无源感知系统有望在物联网中得到较多应用。

2. 国防军工

国防军工是当前超材料的最大应用市场，超材料可在飞行器电磁隐身、雷达散射截面控制等方面发挥特殊的作用，在声隐身、激光武器防护、装备能量吸收等方向也有良好的应用潜力。新一代飞机等装备对轻量化、隐身化、环境适应性提出了极高要求，将提高超材料在相关结构部件、功能组件中的应用占比。

3. 光学与光电子工程

光学器件一直是最具市场前景的超材料研究方向。基于超材料的高分辨光学成像、超薄透镜等为高端光学仪器提供了变革性技术路径，也为增强现实/虚拟现实技术实现提供了新手段。基于超材料的亚波长光子学为克服光信息技术面临的光学器件尺寸偏大、集成困难等问题提供了解决方案。此外，超材料在特种激光光源、全息光学、光信息存储等方面也有一定的应用前景。

4. AI算力

当前，AI应用迅速崛起，算力成为制约AI发展的主要因素之一。以光子代替电子实现更高速度、更大容量、更低能耗的信息处理概念虽早已提出，但光子元件受制于光波长尺度而无法像电子元器件一样进行大规模集成，因而一直未能获得实际应用。基于超材料的光计算技术进展较快，有望打破这一发展僵局，实现亚波长光学器件的集成，使光子学芯片的大规模集成成为可能，为AI算力的跃升开辟新技术途径。

5. 能源工程

基于超材料的辐射制冷技术应用前景广阔，有望形成一定规模的应用市场。超材料的高效光（电磁波）捕获能力为太阳能电池发展注入了新的活力，也为无源能量收集提供了新方案。超材料有望应用于无线能量传输，在发射器、接收器之间产生电磁场以传输电力，在远距离无线充电器、生物医学植入物、电动汽车等设备上有着良好的应用前景。

6. 生物医学工程

电磁超材料在磁共振影像增强，高选择性、高灵敏度生物医学检测方向的应用初见成效。超材料生物传感器可有效提高光学生物传感器的灵敏度和

品质因数, 实现更低的浓度检测极限。此外, 机械(力学)超材料在组织工程、人造骨骼等方面也有良好的应用潜力。

7. 高端装备

声学超材料契合高速铁路车辆等装备的减振降噪需求, 机械(力学)超材料在机器人、低空飞行器等装备上有望获得规模化应用。加载超材料的射电天文望远镜可大幅提高观测的灵敏度和分辨率。此外, 超材料也开始探索应用于暗物质探测等科研装备。

8. 超构工程

基于超材料的工程设计理念有望在一些大型工程上获得应用, 如大型建筑物的抗震结构、海浪防护结构、桥梁骨架结构、太阳能电池板的折纸超材料结构等。尽管这些大尺寸结构设计超出了“材料”范畴, 但技术革新价值明确、潜在应用规模较大。

(二) 超材料的产业链格局

相较常规材料, 超材料的产业链相对简单: 上游环节包含超材料基体的原材料(如金属靶材、陶瓷介质、单晶基片、半导体、增材制造浆料、二维材料、特种高分子材料), 加工制备装备(如微纳加工、增材制造、精密数字制造等方面的装备), 设计装备及软件(如服务器、超算平台、数据库、工业设计软件); 中游环节主要是各类超材料与相关器件的设计与制造; 下游环节为各类应用领域。就国内产业现状而言, 整个产业链是通畅的, 但上游环节的加工制备装备、设计软件仍存在短板。

从国外情况看, 从事超材料研发和生产的企業主要分为两类。①综合性企业, 重在将超材料用于整机产品, 包括大型军工和装备制造企业(如美国的洛克希德·马丁空间系统公司、英国的罗尔斯·罗伊斯公司, 日本的丰田汽车公司), 大型高科技企业(如美国的苹果公司、三星电子有限公司); ②初创型企业, 技术多源于大学的科研成果, 产品类型较为单一, 较为知名的有美国的Kymeta集团(主营超材料平板天线)、MetaShield有限公司(主营光学超材料产品)、Applied Metamaterials公司(主营超材料噪声控制)、Evolv Technology公司(主营超材料毫米波成像系统)、Echodyne公司(主营小型超材料雷达)、Metawave公司(主营超材料

智能雷达), 加拿大的Metamaterial Technologies公司(主营光学超材料), 英国的Metasonics公司(主营声学超材料)、TeraView公司(主营太赫兹超材料成像产品)。

我国的超材料产业化进程与国际同步, 涉足超材料产业的大型企业主要有航空、航天、电子、船舶、通信等领域的国有企业, 包括华为、中兴、联想、京东方等品牌在内的高科技企业。此外, 深圳光启高等理工研究院具有先发优势^[25], 一些具有技术特色的超材料专业企业相继成立, 如深圳迈塔兰斯科技有限公司(主营超材料透镜)、南京光声超构材料研究院有限公司(主营声学超材料产品)、南京南智先进光电集成技术研究院有限公司(主营光学超材料产品与服务平台)、江苏赛博空间科学技术有限公司(主营通信超材料产品)、清超卓影(北京)医疗科技有限公司(主营医用超材料)等。

(三) 超材料的产业发展策略

发达国家在超材料研究及产业化方面采取了不同的发展策略。美国的主要研究支持来自国防部门, 具有军工需求牵引基础研究的发展特点, 较多采用大学成果产业化扩散的发展机制^[26]。英国的主要研究支持来自国家科研与创新署等公立机构, 具有国家重点支持前沿基础研究的发展特点, 较多采用基础研究成果产业化扩散的发展机制^[27]。欧盟的主要研究支持来自“欧盟框架计划”、欧洲理事会, 具有民品应用牵引基础研究的发展特点, 确保基础研究与产业化的密切衔接^[28]。日本的主要研究支持来自大型企业, 具有基础研究应用背景明确的发展特点, 相关成果主要应用到整机^[29]。

相比发达国家, 我国在超材料领域的发展部署更为全面。迄今为止, 国家自然科学基金支持的超材料研究论文产出占全球相关论文的23.7%。《前沿材料产业化重点发展指导目录(第一批)》(2023年)、《新材料中试平台建设指南(2024—2027年)》均纳入超材料, 国家“十三五”规划纲要将超材料列为待发展的高端材料类型, “变革性技术关键科学问题”重点专项、“智能传感器”“高端功能与智能材料”等国家重点研发计划项目均支持超材料研究。此外, 一些地方性的产业规划明确支持超材料产业发展。也要注意, 超材料产业的发展部署仍存在不足: 政策覆盖范围广, 超材料概念泛

化，强调“面面俱到”而重点不够突出，发展目标不够聚焦；指标导向较强，而战略导向不足；对关键环节、技术瓶颈问题的把握不够精准，产业链事宜未得到应有关注。

五、超材料产业发展面临的挑战和新机遇

（一）超材料产业发展面临的挑战

1. 制备技术

制备技术仍是各国发展超材料的主要瓶颈环节。以受到较多关注的光学超材料为例，尽管应用前景清晰、需求明确，但众多的研究工作仍位于原理层次，主要原因是高精度的制备加工手段缺乏；实现具有复杂结构的三维光学超材料技术难度极大，导致很多工作聚集在制备难度较低、与半导体工艺兼容度高的超表面方向，但理想的实验室结果依然稀缺。超材料的进一步发展及其工程应用，强烈依赖各种尺度的高精密材料加工制备技术。

2. 测试与表征技术

超材料的种类和性能参数多样，构建标准化的测试表征技术难度较大。特别是结构单元属于微观尺度的超材料（如光学超材料）、工作尺度位于超大尺度的超材料（如通信和隐身用超材料）、特殊服役环境下的超材料（如减震机械超材料），在工作环境条件下的服役性能监测依然缺乏有效手段。

3. 工程化技术

超材料较常规材料具有更高的设计自由度和性能空间，但与常规材料源于自然、易于获得的特点不同，制造超材料人工结构通常需要更复杂的技术、更高的成本，成为制约超材料产业化、超材料量大面广应用的重要因素。此外，器件化工程中超材料与其他材料的兼容性、超材料器件与其他器件的集成等问题，也是制约超材料产业化发展、规模化应用的因素。

4. 产业链

除了少数具有明确需求的应用（如军用隐身、超材料共型天线）涉及的超材料，多数超材料的产业化发展驱动力都源于新型功能器件。超材料的研发力量以小型初创企业为主，无论是上游的原材料、制备、测试装备，还是下游的应用场景，均未充分发育，也都不够完善，制约了超材料产业成型和壮大的速度。

5. 研发人才

超材料研发需要跨学科的专业基础、较强的理论基础、良好的综合交叉能力，而全球范围均存在超材料高水平研发人员匮乏的情况。国内交叉学科领域的人才培养质量不能满足批量培育高水平超材料研发人员的要求，而高校、科研院所在超材料基础科研的旺盛需求，与超材料企业构成了直接的人才竞争关系。

（二）AI 技术为超材料产业带来新发展机遇

AI 技术发展迅速，成为超材料产业发展最主要的机遇条件。AI 技术为超材料设计提供了强有力的工具，超材料为解决作为 AI 技术应用基础的算力问题提供了新途径，因而超材料与 AI 技术具有良好的互促发展前景。

1. AI 技术在超材料设计中的应用

超材料原理清晰，是具有可逆向设计特性的材料类型。传统的超材料设计方法依赖物理模型、试错法、基于经验的参数优化，但设计需求的多样化、结构的复杂化致使传统设计方法的局限性逐渐显现。例如，超材料设计的计算资源需求高，导致设计过程效率低下；超材料的发现依赖设计者的经验和直觉，需要设计者具有宽广的专业知识；超材料的设计优化过程复杂且不易收敛，试错法的局限性突出表现在仅能进行设计空间内的有限探索。机器学习、数据挖掘、神经网络等 AI 技术，为超材料设计提供了理想的能力支持，可有效克服传统超材料设计方法的缺陷、大幅提高超材料设计效率，有望促成快速高效、智能化的超材料研发范式。

2. 超材料在 AI 技术演进中的应用

按照目前的 AI 技术发展速度，算力需求每年将增长 10 倍，而实际上全球算力的年均增长速度不足 50%，因而算力成为制约 AI 技术演进的瓶颈环节。另外，立足当前以微电子学为基础的计算技术，训练新一代生成型 AI 系统产生的电力消耗将远超预期，导致常规能源系统难以承担。为此，使用光子而非电子进行计算的光计算技术，具有高速度、大容量、低能耗、易于并行的特点，有望克服电子计算的性能瓶颈、大幅提升计算速度，成为支撑未来 AI 技术演进的理想计算技术形式。然而，受制于光学器件衍射极限，单一光学（光子）器件尺寸较大，难以像电子器件一样实现单一器件的纳

米尺度构建与大规模集成, 导致大算力光信息处理系统建设面临重大挑战。针对这一问题, 超材料可提供出路: 超材料可在亚波长尺度上对电磁波进行高自由度的调制, 能够与现有的芯片技术进行兼容和集成, 有望为大规模集成的光计算系统提供符合预期的材料能力。国际上的一些前沿研究成果证明了将超材料用于光计算的可行性及先进性^[30]。光计算技术发展需求也为超材料规模化应用提供了难得的机遇。

六、超材料产业发展建议

(一) 以重点应用需求为牵引进行重大项目布局

瞄准若干重大需求, 布局超材料重点项目, 进而“以点带面”, 全面提升超材料研究水平, 稳健推动超材料产业化。鉴于算力的迫切需求和重要价值, 建议以科技专项的形式推动光计算超材料研究, 由相关国家实验室牵头, 组织优势力量集中开展攻关, 全面提升超材料研究能力与应用水平。此外, 针对应用需求强烈、技术路线明确的超材料提供重点支持, 加快提高超材料辐射制冷、基于超材料的亚波长显微、面向 6G 的智能超表面、超材料赋能生物医学、军用隐身与透波、超材料赋能高端装备等方面的技术成熟度。

(二) 建设国家级超材料制备、大数据与设计平台

制备工艺是各国超材料发展面临的主要瓶颈, 实现精准制备是超材料走向应用的关键环节。建议在现有国家级超材料制备平台的基础上, 面向超材料工程化技术发展需求, 合理加大专用装备研发投入, 持续提高并完善各类超材料的制备工艺水平, 为国内超材料的研究和产业化提供坚实支撑。发挥新型举国体制的优越性, 建设国家新材料大数据中心, 全面收集、挖掘、完善各类超材料的设计仿真数据以及产业链上的数据要素; 形成服务全国超材料研究的平台能力, 加快推动 AI 技术在超材料设计中的应用。

(三) 组建国家级创新联合体并促进跨学科人才培养

推动企业主导的超材料“产学研”深度融合, 面向市场需求开展超材料的全方位研发, 驱动工程

技术开发与原理科学研究相结合, 加快构建超材料创新体系; 同步开展超材料设计、制程、验证的标准化体系建设。加强超材料研发与电子学、光学工程、机械等领域知识的结合, 批量培养高水平的跨学科人才, 保障超材料产业化发展质量。建议将超材料列为交叉学科或者材料科学与工程的一级学科, 在具备条件的高校和科研院所中, 以交叉学科或者自设二级学科的方式多层次培养超材料人才。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 17, 2025; **Revised date:** April 6, 2025

Corresponding author: Zhou Ji is a professor from the School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is metamaterials. E-mail: zhouji@tsinghua.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on National Development Strategy of Metamaterials and Superstructure Engineering” (2023-XZ-68)

参考文献

- [1] Service R F, Cho A. Strange new tricks with light [J]. *Science*, 2010, 330(6011): 1622.
- [2] Walser R M. Electromagnetic metamaterials [R]. San Diego: Proceeding SPIE Complex Mediums II beyond Linear Isotropic Dielectrics, 2001.
- [3] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788–792.
- [4] Zhao Q, Kang L, Du B, et al. Experimental demonstration of isotropic negative permeability in a three-dimensional dielectric composite [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(2): 027402.
- [5] Zhao Q, Zhou J, Zhang F L, et al. Mie resonance-based dielectric metamaterials [J]. *Materials Today*, 2009, 12(12): 60–69.
- [6] Li J, Fok L, Yin X B, et al. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(12): 931–934.
- [7] Leonhardt U. Cloaking of heat [J]. *Nature*, 2013, 498(7455): 440–441.
- [8] Zheng X Y, Lee H, Weisgraber T H, et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials [J]. *Science*, 2014, 344(6190): 1373–1377.
- [9] Stav T, Faerman A, Maguid E, et al. Quantum entanglement of the spin and orbital angular momentum of photons using metamaterials [J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1101–1104.
- [10] 周济. 广义超材料: 超材料与常规材料的融合 [J]. *中国材料进展*, 2018, 37(7): 484–490.
Zhou J. Generalized metamaterials: Merging of metamaterials and conventional materials [J]. *Materials China*, 2018, 37(7): 484–490.
- [11] Sun J B, Zhou J. Metamaterials: The art in materials science [J]. *Engineering*, 2025, 44: 145–161.
- [12] Sun J B, Li T, Zhou J. Emerging frontiers in metamaterials [J]. *Journal of Materiomics*, 2025, 11(3): 100961.

- [13] Pendry J, Zhou J, Sun J B. Metamaterials: From engineered materials to engineering materials [J]. *Engineering*, 2022, 17: 1–2.
- [14] Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917–924.
- [15] Won R. Metamaterials in the bio-world [J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(1): 12–14.
- [16] Kadic M, Milton G W, van Hecke M, et al. 3D metamaterials [J]. *Nature Reviews Physics*, 2019, 1(3): 198–210.
- [17] Brongersma M L, Pala R A, Altug H, et al. The second optical metasurface revolution: Moving from science to technology [J]. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2025, 2(2): 125–143.
- [18] Cummer S A, Christensen J, Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(3): 16001.
- [19] Yu X L, Zhou J, Liang H Y, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review [J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 94: 114–173.
- [20] Portela C M, Edwards B W, Veysset D, et al. Supersonic impact resilience of nanoarchitected carbon [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(11): 1491–1497.
- [21] Li Y, Li W, Han T C, et al. Transforming heat transfer with thermal metamaterials and devices [J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6: 488–507.
- [22] Liu T J, Ou J Y, MacDonald K F, et al. Photonic metamaterial analogue of a continuous time crystal [J]. *Nature Physics*, 2023, 19(7): 986–991.
- [23] Liu Z F, Jin P, Lei M, et al. Topological thermal transport [J]. *Nature Reviews Physics*, 2024, 6: 554–565.
- [24] Markets and Markets. Metamaterial market size, share and trends [EB/OL]. [2025-03-15]. <https://www.marketsandmarkets.com/MarketReports/metamaterials-market-139795737.html>.
- [25] 中投产业研究院. 2024—2028年中国超材料行业深度调研及投资前景预测报告 [R]. 深圳: 中投产业研究院, 2024. CIConsulting. China metamaterials industry deep research and investment forecast report, 2024—2028 [R]. Shenzhen: CIConsulting, 2024.
- [26] 李志荣. 基于文献计量的中美超材料基础研究态势对比及建议 [J]. *世界科技研究与发展*, 2023, 45(S1): 45–59. Li Z R. Comparison of the development trend of metamaterials between China and the United States based on bibliometrics and suggestions [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2023, 45(S1): 45–59.
- [27] UK metamaterials network [EB/OL]. [2025-03-15]. <https://metamaterials.network/>.
- [28] NATO advanced research workshop looks at new exotic materials for civilian and defence use [EB/OL]. (2010-02-25)[2025-03-15]. https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_62082.htm?selectedLocale=en.
- [29] Metamaterials research and innovation center [EB/OL]. [2025-03-15]. <https://web.tohoku.ac.jp/kanamori/0meta-ric/custom1.html>.
- [30] Zangeneh-Nejad F, Sounas D L, Alù A, et al. Analogue computing with metamaterials [J]. *Nature Review Materials*, 2021, 6: 207–225.