



中国基础研究报告

总主编 杨卫

纳米制造的基础研究

纳米制造的基础研究项目组 编

Fundamental Research on
Nanomanufacturing

 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目（CIP）数据

纳米制造的基础研究 / 纳米制造的基础研究项目
组编. — 杭州：浙江大学出版社，2020.4
ISBN 978-7-308-19776-2

I. ①纳… II. ①纳… III. ①纳米技术-高技术产业-
-产业发展-研究 IV. ①TB383
中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第264215号

纳米制造的基础研究

纳米制造的基础研究项目组 编

-
- 丛书统筹** 国家自然科学基金委员会科学传播中心
唐隆华 张志旻 齐昆鹏
- 策划编辑** 徐有智 许佳颖
- 责任编辑** 金 蕾
- 责任校对** 郝 娇
- 封面设计** 程 晨
- 出版发行** 浙江大学出版社
(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)
(网址：<http://www.zjupress.com>)
- 排 版** 杭州隆盛图文制作有限公司
- 印 刷** 浙江海虹彩色印务有限公司
- 开 本** 710mm×1000mm 1/16
- 印 张** 11.75
- 字 数** 163千
- 版 印 次** 2020年4月第1版 2020年4月第1次印刷
- 书 号** ISBN 978-7-308-19776-2
- 定 价** 96.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式（0571）889225591；<http://zjdxcs.tmall.com>

“中国基础研究报告” 编辑委员会

主 编 杨 卫

副主编 高瑞平 韩 宇

委 员

王长锐 王岐东 冯雪莲

杨列勋 杨俊林 邹立尧

张兆田 张香平 陈拥军

周延泽 孙瑞娟 郭建泉

唐隆华 董国轩 韩智勇

黎 明

总 序

合抱之木生于毫末，九层之台起于垒土。基础研究是实现创新驱动发展的根本途径，其发展水平是衡量一个国家科学技术总体水平和综合国力的重要标志。步入新世纪以来，我国基础研究整体实力持续增强。在投入产出方面，全社会基础研究投入从 2001 年的 52.2 亿元增长到 2016 年的 822.9 亿元，增长了 14.8 倍，年均增幅 20.2%；同期，SCI 收录的中国科技论文从不足 4 万篇增加到 32.4 万篇，论文发表数量全球排名从第六位跃升至第二位。在产出质量方面，我国在 2016 年有 9 个学科的论文被引用次数跻身世界前两位，其中材料科学领域论文被引用次数排在世界首位；近两年，处于世界前 1% 的高被引国际论文数量和进入本学科前 1% 的国际热点论文数量双双位居世界排名第三位，其中国际热点论文占全球总量的 25.1%。在人才培养方面，2016 年我国共 175 人（内地 136 人）入选汤森路透集团全球“高被引科学家”名单，入选人数位列全球第四，成为亚洲国家中入选人数最多的国家。

与此同时，也必须清醒认识到，我国基础研究还面临着诸多挑战。一是基础研究投入与发达国家相比还有较大差距——在我国的科学研究与试验发展（R&D）经费中，用于基础研究的仅占 5% 左右，与发达国家 15%~20% 的投入占比相去甚远。二是源头创新动力不足，具有世界影响力

的重大原创成果较少——大多数的科研项目都属于跟踪式、模仿式的研究，缺少真正开创性、引领性的研究工作。三是学科发展不均衡，部分学科同国际水平差距明显——我国各学科领域加权的影响力指数（FWCI 值）在 2016 年刚达到 0.94，仍低于 1.0 的世界平均值。

中国对基础研究高度重视，在“十三五”规划中，确立了科技创新在全面创新中的引领地位，提出了加强基础研究的战略部署。习近平总书记在 2016 年全国科技创新大会上提出建设世界科技强国的宏伟蓝图，并在 2017 年 10 月 18 日中国共产党第十九次全国代表大会上强调“要瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破”。国家自然科学基金委员会作为我国支持基础研究的主渠道之一，经过 30 多年的探索，逐步建立了包括研究、人才、工具、融合四个系列的资助格局，着力推进基础前沿研究，促进科研人才成长，加强创新研究团队建设，加深区域合作交流，推动学科交叉融合。2016 年，中国发表的科学论文近七成受到国家自然科学基金资助，全球发表的科学论文中每 9 篇就有 1 篇得到国家自然科学基金资助。进入新时代，面向建设世界科技强国的战略目标，国家自然科学基金委员会将着力加强前瞻部署，提升资助效率，力争到 2050 年，循序实现与主要创新型国家总量并行、贡献并行以至源头并行的战略目标。

“中国基础研究前沿”和“中国基础研究报告”两个系列丛书正是在这样的背景下应运而生的。这两套系列丛书以“科学、基础、前沿”为定位，以“共享基础研究创新成果，传播科学基金资助绩效，引领关键领域前沿突破”为宗旨，紧密围绕我国基础研究动态，把握科技前沿脉搏，以科学基金各类资助项目的研究成果为基础，选取优秀创新成果汇总整理后出版。其中“中国基础研究前沿”丛书主要展示基金资助项目产生的重要原创成果，体现科学前沿突破和前瞻引领；“中国基础研究报告”丛书主要展示重大资助项目结题报告的核心内容，体现对科学基金优先资助领域资助成

果的系统梳理和战略展望。通过该系列丛书的出版，我们不仅期望能全面系统地展示基金资助项目的立项背景、科学意义、学科布局、前沿突破以及对后续研究工作的战略展望，更期望能够提炼创新思路，促进学科融合，引领相关学科研究领域的持续发展，推动原创发现。

积土成山，风雨兴焉；积水成渊，蛟龙生焉。希望“中国基础研究前沿”和“中国基础研究报告”两个系列丛书能够成为我国基础研究的“史书”记载，为今后的研究者提供丰富的科研素材和创新源泉，对推动我国基础研究发展和世界科技强国建设起到积极的促进作用。



第七届国家自然科学基金委员会党组书记、主任

中国科学院院士

2017年12月于北京

前 言

当今世界，是科技高速发展与高端技术竞争的世界，唯执科技发展与技术创新之牛耳者方可居于世界经济浪潮之前沿。制造业作为国民经济发展的重要支柱，是实现升级发展的“国之重器”。大到星际光年尺度的深空探测，如较成熟的对地观测卫星、载人航天飞船、宇宙空间站，以及新概念太阳帆、微纳卫星、卫星探测器等，依托大尺度纳米精度的制造技术，为人类探索、认识宇宙本质提供了重要支撑；小到分子和原子尺度的解构与重构，如生物分子马达、纳米电动机、纳米机器人、分子光电器件、纳米电路、纳米传感器、纳米智能器件和系统等，凭借基于原子尺度增材、减材或等材制造技术实现材料、结构、器件和系统的构建，为人类探索生命与物质本质提供了重要基础。因此，无论是面向大尺度的纳米精度（超精密）制造，还是小到原子的纳米尺度制造，发展纳米制造的新方法与新技术对于信息、材料、环境、能源、生物医学、航空航天和国防安全等众多领域均具有重要意义，是国家未来战略布局、新兴产业发展、经济结构调整与升级的重要保障。

纳米制造工艺与技术的发展，使制造对象由宏观进入微观与纳观，不仅大幅度提升制造的精度和质量，同时也大大拓宽了制造技术的尺度范围。应用纳米科技得到微观 / 纳观的发现和研究成果，有助于实现微纳米产品

的批量化一致性制造，从而丰富物质产品，大大节约材料和能源。纳米制造的研究，将促进学科交叉、发展新的制造理论和方法，使制造科学的研究更丰富、更深入。为提升我国纳米制造的源头创新能力，国家自然科学基金委员会（National Natural Science Foundation of China, NSFC）于2010年正式启动了“纳米制造的基础研究”重大研究计划项目，瞄准纳米制造前沿发展，以解决国家重大需求为导向，从基于物理/化学/生物原理的制造方法着眼，致力于研究纳米结构生长、加工、改性、组装等纳米制造新方法与新工艺，以及纳米尺度制造过程中结构与器件的性能演变规律，形成我国原创的纳米制造新原理与新方法，提升我国纳米制造水平，致力于解决我国制造技术的瓶颈与“卡脖子”问题。

本重大研究计划遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路，围绕国民经济、社会发展和科学前沿中的重大战略需求，以专家顶层设计和科技人员自由选题申请相结合的方式，凝聚了国内优势力量，形成了具有相对统一目标或方向的项目群，通过相对稳定和一定强度的支持，积极促进学科交叉，培养创新人才，实现若干重点领域或重要方向的跨越发展，从而提升我国基础研究创新能力，为国民经济和社会发展提供科学支撑。

在“纳米制造的基础研究”重大研究计划实施过程中，经专家通讯评审和会议评审，资助项目153项（其中集成项目4项，重点支持项目24项，培育项目121项，战略研究项目4项）。资助项目集中在基于物理/化学/生物等原理的纳米结构制造、宏观结构的纳米精度制造、宏/微/纳跨尺度结构与器件的集成制造、纳米制造精度评价与测量、纳米制造的装备与平台技术5个方向，展开制造科学与数学、化学、信息、生物等学科的交叉，突出了“制造”属性，即如何保证纳米制造的批量化和一致性。重点资助了纳米尺度制造、纳米精度制造、跨尺度制造、装备制造、器件制造、表征与计量等多个领域。本书收集了资助项目中取得的部分研究成果，其

中有相当大数量的中青年科技工作者的优秀论文，表明我国纳米制造计划培育了一支有相当高研究水平的雄厚研究团队，这是该重大研究计划最突出的成果。

经过 8 年的通力协作与奋斗，2018 年 12 月 13 日，国家自然科学基金委员会评审通过了“纳米制造的基础研究”重大研究计划结题。本计划的参与研究人员通过多学科交叉研究，探索了基于物理 / 化学效应的纳米制造新原理与新方法，揭示了纳米尺度与纳米精度下加工、成形、改性和跨尺度制造中的表面 / 界面效应、尺度效应等，阐明了物质结构演变机理，建立了纳米制造过程的精确表征与计量方法，发展了若干原创性纳米制造工艺与装备，特别是揭示了原子层级化学机械去除机制，开创了在原子精度实现电子材料加工的新方法；提出了电子 / 电荷动态调控的纳米结构成形新原理，制造尺度延伸至原子级；发展了跨尺度批量制造的系列方法与技术，在部分产业领域获得应用；建立了较为完善的纳米制造方法与工艺体系，如化学机械抛光、电场力诱导纳米压印、电子束调控孔加工、跨尺度器件制造等，形成自主装备，在若干领域打破国际垄断。项目成果服务于光刻机镜头抛光、靶球微孔阵列制造、高端装备用米级二维计量光栅、空间飞行器表面多级微纳结构蒙皮等国家重大科学 / 工程，从源头上为我国纳米制造工艺与装备水平的提升提供了理论基础。

八年来，从立项、实施到最终成果凝练与总结，感谢指导专家组各位成员、国家自然科学基金委员会各位同志以及国内相关领域中青年研究学者的大力支持，各研究课题组以把握前沿方向、聚焦研究内容、优化研究目标、加强成果凝练为着眼点，围绕重大研究计划的既定要求，努力把基础理论钻透、把成果应用找准、把学科交叉做实，引领了未来纳米制造科技发展方向，展示了当前中国纳米制造的研究水平，有效服务于国家重大需求和国民经济主战场，为将来下游产品的研发和应用做好铺垫。

很高兴国家自然科学基金委员会科学传播中心邀请我们整理出版本重

大研究计划的总结报告、成果报告和战略研究报告，并收录到“中国基础研究报告”丛书。为体现本重大研究计划的重要成果和跨越式发展情况，我们整理了本重大研究计划集成项目、重点项目和培育项目的亮点成果。

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。”本重大研究计划的实施固然取得了一些可喜成果，但这仅是发展新时期中国特色纳米制造技术的开端，未来希望我国科研人员以深化纳米制造理论研究、创新纳米制造关键技术为己任，以保障国家战略需求为出发点，通过与信息、物理、化学及生命等学科的深度融合，深入研究纳米制造的工具、重要材料纳米制造的工艺、纳米制造的装备以及纳米计量方法，系统构建纳米制造理论，攻克核心技术，发展一批原始创新技术，在航空航天、生物医药、信息、新能源等领域，取得一批有重要工程前景的技术成果，并形成可交换的独家核心技术，把成果用在祖国大地上，服务寻常百姓家。



指导专家组组长

中国工程院院士

2019年6月于西安

目 录

第 1 章		
项目概况		01
—		
1.1	项目介绍	01
1.2	项目布局	05
1.3	取得的重大进展	09
第 2 章		
国内外研究情况		13
—		
2.1	纳米制造的国内外研究现状	13
2.2	纳米制造的国家战略需求与发展趋势	16
2.3	我国纳米制造发展态势	21

第 3 章

纳米 / 亚纳米精度制造 27

- 3.1 原子层材料去除理论模型与方法 28
- 3.2 纳米精度制造的重要工程应用 32
- 3.3 纳米精度制造的工艺装备 35

第 4 章

宏微纳跨尺度结构一致性制造 37

- 4.1 电场驱动纳米压印原理与方法 38
- 4.2 半导体材料的电化学纳米压印原理与方法 44
- 4.3 大幅面纳米尺度结构的压印制造装备 48
- 4.4 功能化大面积纳米结构的工程应用 52

第 5 章

纳米结构与器件跨尺度集成制造 61

—

- 5.1 自约束纳米加工的高精度可控制造 62
- 5.2 外场诱导三维微纳结构制造 64
- 5.3 功能纳米结构的按需区域构筑 65
- 5.4 二维材料纳米结构的可控加工方法 68
- 5.5 跨尺度制造的重要工程应用 70

第 6 章

激光微纳制造新方法 73

—

- 6.1 超快激光时空整形微纳加工新原理、新方法 74
- 6.2 超快激光微纳制造过程的多时间尺度观测 76
- 6.3 激光微纳制造的重要工程应用 78
- 6.4 激光微纳制造装备 85

第 7 章		
其他纳米制造原理与技术突破		87
—		
7.1	功能纳米材料 / 结构的制备与应用	87
7.2	纳米结构的无掩膜制造	90
7.3	新型纳米器件制造	97
7.4	纳米制造中的精度计量与溯源	100
第 8 章		
展 望		105
—		
8.1	我国纳米制造存在的不足和战略需求	106
8.2	纳米制造持续研究的设想和建议	108
参考文献		115
—		

成果附录 131

附录1 重要论文目录 131

附录2 获得国家科学技术奖励项目一览表 160

附录3 代表性发明专利一览表 162

索引 165

第 1 章 项目概况

1.1 项目介绍

纳米制造作为支撑纳米技术、信息技术和生物技术走向应用的基础，主要研究纳米结构生长、加工、改性、组装等纳米制造新方法与新工艺，以及纳米尺度制造过程中结构与器件的性能演变规律。近 10 年来，国家自然科学基金委员会对于纳米制造领域的研究一直保持着相当大力度的资助。为进一步提升我国纳米制造的源头创新能力，瞄准学科发展前沿、面向国家发展的重大战略需求，国家自然科学基金委员会于 2010 年正式启动了“纳米制造的基础研究”重大研究计划项目^[1]，旨在针对纳米精度制造、纳米尺度制造和跨尺度制造中的基础科学问题，通过加强顶层设计，凝练科学目标，促进学科交叉，培养创新人才，实现若干重点领域或重要方向的跨越发展，提升我国基础研究的创新能力，为国民经济和社会发展提供科学支撑。

本重大研究计划遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路，围绕国民经济、社会发展和科学前沿中的重大战略需求，把握本计划基础性、前瞻性和交叉性的研究特征，以专家顶层设计引导和科技人员自由选题申请相结合的方式，凝聚优势力量，形成具有相对统一目

标或方向的项目群。8年来,在我国相关科研人员的通力协作下,本重大研究计划充分发挥了机械、材料、物理、化学、生命、信息和力学等多学科交叉合作的优势,拓展了制造对象由宏观进入微观后多种加工原理的物理内涵与技术外延,顺利完成了最初设定的目标,大大拓宽了制造技术的尺度范围,开辟了新的研究领域,大幅度提升了制造的精度和质量,发展了新的制造理论和方法。本重大研究计划对促进学科交叉起到了积极的推动作用,促使制造科学研究更为深入和完善,在将纳米科学新发现转变为前沿制造技术的趋势中,充分发挥了基础支撑作用。

1.1.1 总体科学目标

作为工程与材料科学领域的一项重大研究计划,“纳米制造的基础研究”旨在通过多学科交叉研究,探索基于物理/化学效应的纳米制造新原理与新方法,揭示纳米尺度与纳米精度下加工、成形、改性和跨尺度制造中的表面/界面效应、尺度效应等,阐明物质结构演变机理,建立纳米制造过程的精确表征与计量方法,发展若干原创性纳米制造工艺与装备,为实现纳米制造的一致性和批量化提供理论基础。因此,本重大研究计划聚焦于下列研究方向,并取得了一系列研究突破^[2,3]。

亚纳米级精度表面制造原理与方法。从物质的原子/分子与能量束之间的作用机制出发,揭示原子迁移和原子尺度下材料去除加工规律;建立新的制造原理、方法和工艺路线,为解决14 nm以下线宽的IC制造提供了理论支撑和技术途径。

大面积微纳米结构精确复形制造。从微纳米间隙中外场诱导的物理/化学作用机制出发,揭示微纳米结构生成过程中材料流变与去除规律,建立新的制造原理、方法和工艺路线,实现柔性电子器件、新型传感器、微光学阵列元件等大面积微纳结构高效制备。