序　一

物理学培养人的成功之处是从复杂自然现象中寻找最简洁的内在规律。长期以来，凝聚态物理学家们致力于理解原子在物质中的排列方式及其产生的宏观物性。然而，仅仅“理解”是不够的，如何在原子尺度上主动地操控物质，按需构筑具有特定功能的结构已经成为一个新的目标。这正是“原子制造”这一前沿领域的核心魅力所在，也是我多年来在表面物理研究中一直关注的方向。

看到《原子制造科学与技术》这部书稿，我倍感欣慰。这不仅因为它是该领域内一部较为兼具系统性与前瞻性的著作，更因为这部书的作者团队汇聚了宋凤麒、戴庆、刘开辉等一批正处于创造力巅峰的青年科学家。看到他们共同开拓这片“无人区”，我对我们国家未来的科技进步充满希望！

过去几年，我也密切关注着“原子制造”相关项目的发展。从“十三五”期间中国科学院的前瞻布局，到“十四五”期间国防领域的重点支持，再到国家工业和信息化部、自然科学基金委的共同筹划，这一方向如今已得到领域内广大专家学者的认可。这一历程充分体现了国家对基础前沿科学的高度重视，也印证了原子制造在未来科技竞争中的战略地位。

原子制造是制造技术的极限，也是物理学应用的前沿。当制造的尺度进入原子级别，我们面对的不再是宏观世界经典力学层面的组装，而是微观世界量子力学主导下的操控。这本书将物理学的深刻洞察与先进的工程技术紧密结合：既有对扫描探针技术、二维材料、原子团簇、冷原子等的深入剖析，也有对单原子器件、量子芯片等未来应用场景的宏大构想。作者们没有局限于单一的技术路线，而是试图从科学原理出发，勾勒出原子制造的完整图景。书中的许多观点和案例，都源于作者们在实验室里的第一手探索，既有理论的深度，又有实践的温度。

科学的未来在青年人手中。愿这些年轻的开拓者们，在原子制造的微观天地里，构筑出更加宏伟的科学大厦。

中国科学院院士 王恩哥

2025 年底于北京

序　二

制造技术正站在历史性的转折点上。当传统加工精度逼近物理极限，一个以原子为基本单元的制造新纪元正在向我们走来。原子级制造不仅是技术指标的又一次跃迁，更是制造理念的根本变革——它意味着人类将获得在物质世界最基础层面进行“创制”的能力，这可能是制造技术发展的顶级形态之一。原子级制造包含原子级尺度制造、原子级精度制造和原子级测量。原子级制造与原子制造没有本质区别，也经常混用。严格定义上讲，原子级制造的内涵更为广泛一些。

当前，全球主要科技强国都在积极布局原子级制造这一战略方向。从基础科学的突破到工程技术的探索，从实验室的原理验证到产业化的初步尝试，原子制造正逐步从构想走向现实。我国在这一领域起步及时，已在国家层面展开了系统部署，北京、上海、江苏、浙江等多个省市也相继推出省级研究计划与相关基地建设方案，初步形成了多层次、多区域的协同创新网络。这种广泛而深入的布局，反映出国家对这一前沿技术方向战略意义的高度共识。

原子制造的本质是跨学科的深度融合。它要求机械工程提供近乎极限精度的操控平台，物理科学揭示原子尺度相互作用的本质规律，化学方法实现特定的原子结合与反应路径，材料科学构筑宏观性能与微观结构的关联桥梁，光学与电子技术保障精密测量与控制系统，而人工智能技术则有望为复杂的原子制造过程提供优化与决策支持。这种多学科的深度交融，不仅将催生新的技术突破，更将孕育全新的科学范式。

《原子制造科学与技术》作者团队是一批富有热情与创新精神的青年学者。他们在原子制造这一充满挑战的领域深耕多年，与国内相关研究团队保持着密切的学术交流与合作。该书系统地梳理了原子制造的科学基础、技术路径与发展前景，既涵盖了扫描探针技术、原子层沉积、分子束外延等相对成熟的技术方向，也探讨了原子团簇操控、DNA自组装、量子点精确集成等新兴前沿。尤为可贵的是，书中不仅介绍了技术原理，还深入分析了各类技术向工程化、产业化迈进所面临的关键挑战与可能的解决方案，为读者提供了从科学原理到技术实践的完整视野。

原子制造的技术价值在于其前所未有的精确性与可设计性。在集成电路领域，原子精度制造有望突破现有光刻技术的物理限制，为延续摩尔定律提供新的可能；在量子技术领域，原子尺度的精准操控是实现量子比特相干操控与大规模集成的关键基础；在高端材料领域，原子级界面设计与结构构筑将带来性能的颠覆性提升；而在生命科学领域，

原子精度制造技术有可能为生物分子器件的构建提供全新的工具集。

推动原子制造的发展，需要构建开放协同的创新生态。这既需要国家层面的战略引导与持续投入，也需要高校、科研院所的基础研究与技术攻关，更需要企业的早期介入与产业转化。特别值得注意的是，原子制造作为一个新兴领域，尚未形成固定的技术路径与产业格局，希望我们抓住这一机遇，通过顶层设计与底层创新的有机结合，探索符合人类制造业发展的技术途径。

期待这本书的出版能够吸引更多优秀学者，特别是青年科研人员关注并投身原子制造这一充满希望的领域。原子制造的研究与突破，不仅需要精深的理论探索，也需要工程化的实践智慧；不仅需要单个技术的突破，更需要系统性的集成创新。同时，也希望这本书能够成为这一进程中的一块基石，为构建原子制造技术体系贡献智慧与力量。

原子制造，这一人类制造能力的极限挑战，正在呼唤着我们的智慧与勇气。让我们携手，共同迎接这一制造技术的新纪元。

中国科学院院士 雒建斌

2025 年 12 月

序　三

制造业的每一次跨越式进步，都源自加工精度的革命性突破。当前，制造技术正从纳米尺度向原子尺度演进，这一演进不仅代表着制造精度的极限追求，更意味着制造科学从基础理论到方法论的深刻变革。在原子制造中，量子效应和表界面效应占据主导地位，制造过程已超越传统宏观力学与统计规律的范畴，亟待构建融合机械工程、材料科学、量子物理、化学合成等多学科的新兴制造科学体系。

《原子制造科学与技术》由宋凤麒带领的一批年轻学者团队撰写，系统梳理了原子制造领域的关键技术进展与发展路径。这本书内容全面深入，既涵盖了扫描探针技术、原子团簇工程、自组装方法等原子操控的基础原理，也重点探讨了原子制造向工程化、产业化迈进所面临的装备开发、工艺优化、系统集成等关键技术挑战。特别值得关注的是，这本书中对“走向原子级水平的机械制造”的论述，从机械工程视角深入剖析了原子操控增材、减材和等材制造三大路线面临的科学技术问题，为原子制造技术的实用化发展提供了理论与技术指引。

原子制造技术的工程化突破，关键在于实现从单原子操控到元器件制造、从实验室演示到批量稳定生产的跨越。这需要在保持原子操控精度的同时，大幅提升制造效率与一致性；需要在量子效应主导的材料微观行为与元器件宏观性能之间建立可靠的映射模型；更需要发展出适应原子制造特殊要求的专用装备与工艺体系。该书在这些方面均进行了有益探索，提出了多条具有可行性的技术路径。

从产业发展视角看，原子制造技术有望在多个领域催生变革性应用。在微电子领域，原子精度制造可能突破现有光刻技术的物理极限，为下一代集成电路发展提供全新解决方案；在量子技术领域，原子尺度结构制造可为实现量子比特的精准操控与集成提供关键技术支撑；在高端装备领域，原子级表面处理与改性技术可大幅提升关键部件的性能与寿命。这些潜在应用方向在书中均有深入分析与前瞻展望。

这本书的重要价值在于，它系统构建了原子制造的技术体系框架，填补了该领域系统性专著的空白。作者团队不仅总结了国际前沿进展，更融入了自身在原子制造装备研发与工艺探索中的创新成果，体现出理论与实践紧密结合的特色。全书贯穿了多学科交叉融合的思想，对推动相关领域的技术创新与人才培养具有重要学术价值与工程指导意义。

原子制造代表着制造技术发展的战略方向，其实质是从物质最基本单元出发的功能

创制。这一领域的突破，将带动我国制造向全球创新链高端迈进。期待这本书能为制造领域的科研工作者与工程师提供重要参考，推动原子制造技术在我国深入发展，为加快建设制造强国贡献新的科技力量。

中国科学院院士 丁汉

2025 年 12 月

序　四

制造精度的演进，始终是人类科技发展的重要标志。从微米到纳米，从纳米到原子，每一次精度的跃迁，都引发了制造技术的一次革命。当制造精度进入纳米尺度后，继续往下发展，我们面临的不只是技术指标的提升，而很可能逼近人类制造精度的极限。《原子制造科学与技术》这部专著所呈现的，正是这样一个跨越性的科技前沿。

原子制造与传统超精密加工的本质区别在于：后者仍属于“连续介质”范畴的加工，而前者已经进入“量子化”的物质构建。这种区别不仅是技术路径的不同，更是科学原理的跨越。令人振奋的是，在这个跨越性的技术方向上，我国科学家，特别是刚刚崛起的青年科学家，与国外同行几乎站在同一起跑线上。甚至在一些关键技术上，我们还具有独特优势——这正是国家前瞻布局的战略意义所在。

我与宋凤麒教授相识已有两年多，和他们这些青年作者团队在原子制造领域的合作，让我对这个方向有了更深的认识。在多次技术论证和发展规划讨论中，我能感受到这批青年科学家的朝气和远见。他们不仅在理论上深入探索原子制造的科学基础，更在工程实践中扎实推进大科学装置的建设和完善。我曾亲临南京大学考察原子制造实验平台，那些精密的原子团簇操控系统和表征装置，体现了这些青年科学家在极端精度领域自主创新的决心。

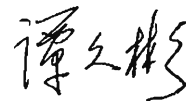
作为长期从事超精密测量与仪器技术研究的科技工作者，我深切体会到测量与制造是一对互为依存、互为支撑的共生技术，测量精度的提升，会有效牵动制造精度的提升；而制造能力的发展，又反过来助推测量技术的发展。原子制造之所以成为未来制造的必然方向，正是因为它同时挑战了目前制造精度的极限和测量精度的制约——我们不仅要能够操纵单个原子，还要能够“看见”这种操纵的结果，甚至操作的过程，能够“度量”原子尺度的结构及产生的各种新特性。

我在自己四十多年的研究实践中深刻体会到，测量与制造的融合创新是突破技术瓶颈的关键。在原子制造领域，这种融合显得尤为重要。制造一个原子精度的结构只是第一步，更重要的是要能够精确测量这个结构的微观尺度、成分、电学、力学和光学特性等参数，并建立制造工艺与最终性能之间的定量关系。只有这样，原子制造才能从实验室的“艺术”变成可设计、可控制、可重复和可规模制作的工程技术。

在多年的科研生涯中，我见证了我国一些精密/超精密制造与测量技术从追赶到并跑的历程，在一些点上也出现了领跑的局面。而在原子制造这个科技前沿上，我们则有机

会实现领域性领跑。这不仅需要相关学科科学家们的交叉创新智慧，更需要相关领域工程师们的革新精神；原子制造科技的突破必将引发新一代产业变革，这需要产学研用的深度融合，更需要有为政府的超常规推进。该专著的工作，展现了这些融合的初步成果，也为未来的发展奠定了坚实基础。

期待这本专著的出版能够推动原子制造领域的发展，吸引更多优秀青年人才投身于这个充满希望的前沿领域。也期待在不久的将来，中国科学家能够在原子制造这个战略高地上，做出系统性的原创性贡献，让这一科技革命与产业变革首先诞生在中国大地上。



中国工程院院士 谭久彬

2025 年 12 月

序　五

纵观人类改造自然的历史过程，是一部对物质和材料从认识到使用、从加工到创新的宏伟制造史。从工业时代的机器制造，到电气时代的电气制造，再到信息时代的微电子制造和当代的纳米制造，随着科技的不断演进和变革，我们对新物质、新材料的追求正朝着“精准化、微型化、功能集成化”的方向推进。可以预想，制造水平进一步往前发展，必然进入组成物质的本源——原子层次。

从化学与材料视角来看，原子是组成物质世界的最小基本单元，其排列方式、成键状态与界面作用将直接决定材料的物理化学性质，而原子制造科学正是通过对原子状态的精准调节，原子之间的程序化装配与控制，突破传统制造技术的尺度限制，实现从“宏观块状”到“原子精准构筑”跨越式发展的一门全新学科，为物质科学提供最底层的制造解决方案。当前，原子水平的制造科学与技术正在逐渐受到国内外学界的关注，在涉及表界面科学、超分子化学、材料学、微电子等学科交叉领域已取得了一些突破性进展，如单原子催化、原子基元组装材料、单原子器件等。我们也注意到，学界尚未将原子制造科学列为一门全新学科，也还没有产生对原子尺度制造方法、制造技术及其内在原理进行系统性论述的科学著作。然而，原子制造科学必然将对芯片制造、新能源材料、生物医学等诸多领域产生巨大影响，因而构建系统、完整的原子制造科学理论与技术体系恰逢其时。

在此背景下，《原子制造科学与技术》一书的编撰，源于对原子制造领域研究现状的深刻洞察与学术担当。当前原子制造研究虽取得一些“点”的突破，但仍面临诸多核心瓶颈：其一，在基元合成层面，原子精准组装的热力学调控机制尚不明确，缺乏高效且精准的原子级构筑方法；其二，在材料表征层面，针对原子尺度的结构与性能关联分析技术存在短板，难以实时追踪原子组装过程中的动态变化；其三，在功能应用层面，原子制造技术的规模化放大路径尚不清晰，寻找原子基元构成材料后“涌现”颠覆性功能的路径有待开发。通过系统梳理原子制造的化学与材料学基础，整合国内外最新研究成果，厘清原子制造的核心科学问题，为该领域的研究者提供全面、深入的学术参考，推动原子制造技术从实验室走向产业化，这既是突破我国高端制造“卡脖子”技术的迫切需求，也是推动化学与材料科学前沿发展的必然选择。

该书的编撰凝聚了作者多年的研究心血，也参考了国内外诸多学者的重要成果。

相信这本书能为原子制造领域的研究者提供有益的学术启发，引领我国原子制造科学与技术的发展。

中国科学院院士 樊春海

2025 年 12 月

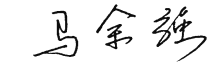
序　六

原子制造代表着人类对物质操控能力的终极追求。当我们在原子尺度上实现精确构筑时，我们不仅在创造新材料、新器件，更是在构建一个全新的物质创制范式。这种范式打破了传统制造的界限，让材料设计与功能实现达到了前所未有的自由度。从某种意义上说，原子制造是在物理极限处重新定义“制造”这一概念——它不再是简单的加工与组装，而是从物质最基本单元出发的功能构建。

当前，我国正处于从科技大国向科技强国迈进的关键时期。原子制造作为可能引领新一轮科技革命的前沿领域，正受到各方面的高度重视。该书的出版恰逢其时。它系统地总结了原子制造领域的关键技术进展，涵盖了从扫描探针技术到原子团簇工程，从自组装方法到冷原子操控等多个前沿方向。这些内容既有扎实的理论基础，又有丰富的实验案例。更难能可贵的是，书中不仅介绍了技术方法，还深入探讨了从原子操控到功能实现的科学逻辑，这对推动整个领域的发展具有重要意义。

作为宋凤麒教授在南京大学物理学院多年的同事，我见证了他从王广厚院士团队中的研究生成长为原子制造领域研究人员的历程。他和戴庆、刘开辉、安钧鸿、闫强、于浦、姚广保这支年轻团队，用了十余年时间，让原子制造这颗种子生根发芽、茁壮成长。我曾参观过他们搭建的大科学装置，那些精密的原子操控平台和独特的表征手段，体现了中国科学家在高端科研装备自主创新方面的决心与能力。

在物理学的发展历程中，每一次对物质更深层次的探索，都会带来认识上的飞跃和技术上的革命。原子制造正处在这样一个历史节点上——它既是对现有制造技术的极限突破，也是对未来物质创制方式的积极探索。我相信，这本书将成为中国科学家在这一前沿领域发出的响亮声音，也会激励更多年轻学者投身到这个充满挑战与机遇的研究方向。



中国科学院院士 马余强

2025 年 12 月

序　七

物理学大师理查德·费曼在 1959 年曾留下那句著名的预言：“底部还有很大空间（There’s Plenty of Room at the Bottom）。”这不仅仅是对微观世界的浪漫憧憬，更是对人类掌控物质世界能力演进的终极指引。作为一名长期从事凝聚态物理研究的科研工作者，我见证了人类从“观测原子”到“理解原子”，再到如今尝试“制造原子结构”的伟大历程。当宋凤麒教授、戴庆教授、刘开辉教授等同仁邀我为这部《原子制造科学与技术》作序时，我深感欣慰，因为这部著作正是在这一极限尺度上，为人类的创造力写下的科学注脚。

从物理学的视角来看，原子制造是人类历史上第一次尝试在物质的最基本层面上，通过打破与重组化学键、调控原子轨道耦合，来按需定制材料的物性。过去几十年，我们在超导材料、拓扑材料中发现的新奇物态，往往依赖于自然的馈赠或对大块晶格的宏观调控。而原子制造的兴起，预示着我们将从“被动寻找”转向“主动构筑”。通过扫描探针的精准拨动、原子团簇的模块化组合、二维尺度的原子层堆叠，我们正在进入一个“结构决定功能”的极致时代——在这里，一个原子的位置偏移，就可能触发拓扑物态的转变或量子相干性的飞跃。

这本书的出版恰逢其时。它不仅系统梳理了从基础理论到前沿工艺的完整链条，更难能可贵地展现了中国学者在该领域的集体智慧与战略思考。书中涵盖的内容极为广博：从精细的单原子操控到宏量的团簇合成，从经典的薄膜生长到前瞻的生物组装，这些技术手段在原子尺度上的交汇，正催生出一门全新的交叉学科。

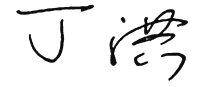
尤其令我振奋的是，该书不仅讨论“如何造”，更深入探讨了“如何测”与“如何算”。在原子尺度，制造不再是简单的机械过程，而是物理测量与计算仿真的高度融合。量子力学的第一性原理计算已经成为指导实验的“导航仪”，而超快动力学表征则成为捕捉原子运动瞬间的“高速相机”。这种全方位的技术集成，正是原子制造能够从科学构想走向工程现实的基石。

当前，量子信息、半导体先进制程、极高能效器件正处于突破的前夜。原子制造作为底座技术，其重要性不言而喻。它不仅是解决我国诸多核心技术“卡脖子”困境的关键路径，更是我们实现技术反超、建立未来产业优势的机遇所在。

原子制造是一场马拉松，前路尚有无数未知的物理鸿沟等待跨越。但我相信，这本书的出版将激励更多年轻的物理学者、材料学家和工程师投入这一充满魅力的方

向。在原子的层级上重塑世界，这不仅是制造的终极理想，更是人类智慧对自然的最高致敬。

是为序。



中国科学院院士 丁洪

2026 年 1 月于上海交通大学李政道研究所

序　八

物质世界最基本的单元是原子。从古希腊的原子假说到现代科学的确证，人类对物质构成的探索从未停歇。当我们可以“看见”并“摆布”原子时，一种全新的制造范式——原子制造应运而生。这种在原子尺度上实现精准构建与功能创成的技术，代表着人类的制造能力接近了已知的物理极限。

原子制造意味着人们能够以原子为基本单元，以人工可控的方式逐层、逐点精准地构筑材料与器件，以近乎完美的结构控制达到极限的物理性能。从极限集成度的器件到原子级别完美的新材料，它不仅是人类对物质世界认知的延伸，更是制造技术的终极梦想。近年来，扫描探针技术、原子层沉积、冷原子操控等前沿技术的突破，使人类在原子尺度上的操控能力日益推进，越来越接近这一梦想。集成电路技术节点已逼近 2 nm，单原子器件研究成为国际前沿热点，标志着原子制造正从科学探索走向技术现实。

然而，这个快速兴起的多学科交叉领域尚缺乏系统的知识结构，亟需一本能够反映该领域全貌、汇聚关键技术进展的参考著作，以宋凤麒教授为代表的青年学者团队基于上述考虑，编写了这本书。

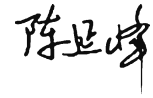
宋凤麒教授与我共事多年，他自学生时代就在南京大学固体微结构物理国家重点实验室学习成长，二十多年来，致力于物质科学中团簇物理的前沿研究。他师从我国原子团簇物理研究的开拓者王广厚院士，学习和继承了老一辈科学家求真务实、敢为人先的科学精神，并成长为中国原子制造技术研究的青年骨干。宋凤麒、戴庆、刘开辉、安钧鸿等二十余位优秀青年学者已经在一起合作开展原子制造研究近十年，而这十年正是中国原子制造从概念萌芽到体系初建的关键时期。他们在原子团簇物理、低维材料构筑、原子尺度表征等方面取得了一系列重要成果，部分工作已走在国际前列。这本书是他们十年探索与经验积累的系统总结，也是一支年轻团队成长的生动见证。

该书从原子精准操控的技术基础出发，系统介绍了扫描探针技术、原子团簇技术、自组装技术、色心缺陷工程、冷原子分子技术、二维原子层材料、分子束外延、原子级机械制造等多个方向的最新进展。这些内容既反映了国际前沿动态，又凝聚了作者们长期的学术理解与实践心得。通过对这些技术路线的梳理，展现了原子制造从原理到实践、从设计到实现的发展脉络。同时，该书也对原子制造的学科框架、发展逻辑与未来趋势进行了深入的讨论。当然，原子制造作为一个蓬勃发展的新兴领域，其边界仍在不断拓展。

我愿意借此机会向所有关心与支持原子制造发展的学界前辈、同行专家表示敬意。

同时，感谢以宋凤麒教授为首的年轻团队，他们不懈的努力和辛勤的耕耘为中国原子制造事业留下了阶段性的坚实而重要的脚印。

愿此书能激励更多青年才俊投身于这一终极制造技术的探索，也祝愿中国科学家能在人类操控物质的最前沿的探索中，不断贡献出中国智慧和力量。



中国科学院院士 陈延峰

2025 年 12 月

序　九

人类制造能力的演进史，就是认识物质、理解自然与改变世界的历史。从冷兵器到蒸汽机，从电气时代到信息时代，每一次技术跃迁都伴随着对物质世界结构更深层的洞察。今天，当测量与操控能力逼近原子尺度，一种新的制造范式正在形成——原子制造正从科学愿景走向技术现实。

原子是构成物质世界的最基本单元。从原子出发进行构筑与调控，是对“制造”概念的根本重释。传统制造依赖自上而下的加工与塑形，而原子制造开辟了从“原子到产品”的新路径。这不仅意味着尺寸的缩小，更意味着理念与体系的跃迁：从宏观世界的力学设计走向微观世界的量子工程，从物性“发现”走向结构与功能的“创制”。

回望科学史，从分子运动到量子力学，从原子成像到操控，人类对微观世界的理解不断深化。近年来，扫描探针、冷原子操控、色心体系、分子束外延与原子级自组装等关键技术快速发展，多种“自上而下”与“自下而上”的制造工艺正不断逼近原子尺度极限，使在原子层面进行精细构筑成为现实。原子制造并非偶然概念，而是百年积累与多学科交叉发展的必然结果。谁能率先实现原子级制造的体系化与工程化，谁就能在未来科技与产业格局中掌握主动权。这既是科学问题，也是关系长远发展的战略命题。

在此背景下，《原子制造科学与技术》的出版恰逢其时。全书以原子级精准操控为主线，系统介绍扫描探针、原子团簇、二维材料、薄膜外延、核酸介导组装、超精密加工、先进表征与多尺度计算等方向，既关注基础问题，也重视工程路径；既讨论微观机制，也展望应用前景。尤为重要的是，书中强调从“可测”与“可控”出发，面向放量、装配集成与高分辨检测等工程关键环节，勾勒出原子制造走向应用的现实路线。可以说，这不仅是一本关于前沿技术的学术专著，更是一部试图回答“原子制造之路如何走向未来”的思考之书。

我欣喜地看到，该书作者团队长期扎根一线，在材料物理、凝聚态、量子调控、工程技术等方面积累深厚，将不同领域成果融会贯通，呈现出原子制造这一新兴方向在理论框架、技术体系与学科结构上的清晰脉络。尤其难能可贵的是，这本书并未局限于单一技术路线，而是从更高层次反思共性原理，体现出建设未来科学与工程“共同语言”的探索精神。原子制造既是科学前沿，也是时代命题；既需要基础研究的定力，也需要技术转化的勇气。面向未来，或许正需探索“质”与“量”并举的创新途径。可以预见，随着理论突破、仪器进步与交叉融合深化，从单原子调控到规模化制造，从实验平台到

产业应用，原子制造将释放更为深远的潜能。

我相信，这本书将为青年学生打开通向原子世界的大门，为科研人员提供系统参考与启发，也将激励更多青年才俊投身这一令人振奋的领域。

谨以此序，向作者团队表示由衷的敬意，也向所有为原子制造探索付出心血的科研工作者致以诚挚的问候。

中国科学院院士 张靖

2025 年 12 月

前　言

原子制造是一种通过精确操控物质世界最基本单元——原子，来实现极端精密制造的前沿技术。它代表着制造能力向原子尺度的极限迈进，能够逐个原子地构建完美结构，并对产品性能进行原子级别的优化。人们普遍相信，一旦实现了对原子的自由操控，便可以按需设计和构筑具有特定功能的原子级微纳结构，从而开发出具备极限集成度、超高灵敏度、超高速度与高通量特性的传感、计算与通信器件。同时，这项技术还将催生原子级别结构完美且经过彻底重构的全新材料与系统，甚至有望实现具备智能行为的先进装置。

因此，原子制造被誉为一种“上帝视角”下的物质创制方式，不仅是未来制造技术的重要方向，更是人类制造能力演进的自然趋势。它象征着人类对物质世界的深层掌控，承载着在微观尺度上重塑自然、实现技术突破的终极梦想。

近年来，扫描探针技术、原子团簇束流、原子层堆叠、冷原子操控以及精确自组装等具备原子级操控能力的前沿技术取得了长足发展，多种“自上而下”与“自下而上”的制造工艺正不断逼近原子尺度极限。在产业应用层面，集成电路技术最具代表性，其产品中最小器件特征尺寸已缩小至 10 nm 量级，部分先进制程甚至进一步突破该节点；与此同时，学术界已开始探索基于单原子的集成电路技术，推动电子器件向极致微小化迈进。在原子操控方面，自 20 世纪 80 年代人类首次实现对单个原子的观测与操纵以来，相关技术迅速演进，我国也及时布局并掌握了核心技术。进入当代，原子操控在精度、自由度和效率等方面均取得显著突破，实现了对原子位置、排列和耦合状态的精确调控，催生出大量原子级精准构筑的新型材料、功能器件与量子系统。在此背景下，原子制造正从科学构想逐步走向工程技术现实，成为引领未来科技变革的重要方向。

在这一背景下，自 2015 年起，我国与一些主要发达国家几乎同步从国家层面启动了原子制造技术的研发布局。当前，我国正处于大国科技竞争日益激烈的格局之中，先进微纳制造技术成为战略制高点，其中尤以核心技术的自主可控最为关键。“卡脖子”问题频现，凸显出突破关键制造瓶颈、实现技术自立自强的紧迫性。值得重视的是，我国在原子操控技术及物质科学基础研究方面已积累了较为扎实的基础，整体水平接近国际前沿。若能从现阶段起高度重视原子制造技术的发展路径，该领域有望不仅摆脱被“卡脖子”的困境，更可能在未来实现技术反制，形成“卡别人脖子”的战略优势。正因如此，从中央级科研资助机构到地方政府，再到一批龙头企业，纷纷布局原子制造重大研究计划。全国性学术交流持续活跃，每年举办的原子制造专题会议为学界与产业界搭建了重要对话平台。在中国科协发布的 2022 年十大前沿科学问题中，“如何实现原子尺度精准制备和结构调控以构建未来信息功能器件？”（即“信息器件的原子制造”）和“能否实现材料表面原子尺度可控去除？”（即“材料表面的原子制造”）两大命题赫然在列，彰

显其战略地位。2023 年，国家自然科学基金委与中国科协组织多场高端论坛，在“高端制造”方向票选出的首要科学问题即为“如何实现原子级可控制造”，同时“纳米科技十大挑战”中亦有议题聚焦于原子级精准制造。进入 2024 年，全国范围内多次召开原子级制造专题会议，国家层面开始明确将原子级制造列为未来产业重点培育方向。2025 年，工业和信息化部、国家自然科学基金委相继设立前沿专项，加大对该领域的系统支持。上述趋势表明，原子制造的技术体系、研究队伍和影响力正在我国加速形成，已进入从基础积累向系统突破跃迁的关键阶段。在此之际，亟需一部系统梳理国内外进展、凝练发展思路的专题读物，为本领域科研人员及相关技术人员提供理论参考与实践指引。这正是我们组织编写本书的初衷与使命所在。

迄今为止，人们已在多个方向上掌握了原子操控的关键技术，充分展示了原子制造的巨大潜力与广阔前景。本书所探讨的原子制造技术涉及广泛而深厚的学科基础，且该领域正处于快速发展阶段，尚未形成一个完整、定型的学科体系。我们这些长期得到国家持续支持、致力于该领域研究的科研工作者，深感有责任对近年来国内相关技术的发展进行系统性总结与提炼。为此，本书选择从原子级精准操控能力的角度切入，系统介绍扫描探针技术、原子团簇技术、基元配合与自组装技术、固体功能原子(缺陷)中心(如色心)技术、原子态极端操控技术、冷原子分子技术、二维原子层材料技术、分子束外延技术以及原子级机械制造技术等多个前沿方向。我们力求梳理和呈现近年来具有代表性和示范意义的重要进展，尝试厘清从原子操控迈向原子制造的技术路径与发展脉络，并对原子制造的学科构建进行前瞻性思考与探索。

近年来，学界相继提出了“原子制造”“原子级制造”“原子与近原子尺度制造”等多个概念。其中，“原子级制造”和“原子与近原子尺度制造”的范畴更为广泛，而“原子制造”则是其核心内容之一，代表了人类在制造领域更为长远的理想与追求。从广义上看，它象征着人类对物质世界实现极致掌控与精准改造的终极愿景；从狭义而言，它指的是一种基于原子层级精确操控、从原子出发构建最终产品的自下而上的制造路径。正如本书书名所示，我们主要聚焦于“原子制造”，同时适度涵盖“原子级制造”和“原子与近原子尺度制造”的相关内容。

本书的编写源于我们对原子制造技术的浓厚兴趣，这一方向也得到了众多专家学者和相关领导的鼓励与支持，同时获得了多家学术机构及地方政府的资助。在撰写过程中，多位同仁积极参与、鼎力相助，尤其要感谢陈斌斌、顾陆薇、陆思齐、卫长正、吴迪、杨卓寒、杨简、胡俊涛、王子琦、胡石涛等同志为本书撰稿所付出的大量努力。在此，作者谨向所有给予帮助和支持的单位与个人致以诚挚谢意。尽管我们已对书稿进行了多次审阅与修改，但限于水平，疏漏之处仍恐难免，恳请广大读者批评指正、不吝赐教。

宋凤麒

2025 年 12 月

目　录

0　绪论 …… 1
0.1　原子制造发展背景 …… 1
0.2　原子制造基本概念与核心特征 …… 3
0.2.1　原子制造基本概念 …… 3
0.2.2　核心技术特征——原子精准操控 …… 5
0.2.3　产品效果特征——原子精确结构创制与颠覆性物性 …… 8
0.2.4　技术路线特征——自下而上 …… 11
0.2.5　原子制造技术与产品体系 …… 11
0.3　未来发展 …… 16
参考文献 …… 17

1　基于扫描探针术的原子制造 …… 19
1.1　扫描探针显微术概况 …… 19
1.1.1　扫描隧道显微镜 …… 20
1.1.2　原子力显微镜 …… 24
1.1.3　其他扫描探针显微镜 …… 27
1.2　基于扫描探针的原子级操控 …… 28
1.2.1　基于扫描隧道显微镜的原子级技术 …… 28
1.2.2　真空环境原子力显微镜原子操纵技术 …… 33
1.2.3　原子力显微镜单原子注入技术 …… 35
1.3　基于扫描隧道显微镜的量子模拟 …… 36
1.3.1　STM 模拟量子材料概述 …… 36
1.3.2　利用 STM 在金属表面操纵原子和分子模拟二维量子材料 …… 37
1.3.3　利用金属表面空位原子构筑人造晶格 …… 39
1.3.4　利用 STM 在半导体表面构造人工量子点 …… 40
1.3.5　STM 模拟一维链概述 …… 42
1.4　扫描隧道显微镜技术的单原子量子器件和计算 …… 47
1.4.1　量子比特基础 …… 47
1.4.2　单原子量子器件 …… 48
1.4.3　电子自旋和原子核自旋读出 …… 49
1.4.4　单电子的单比特门 …… 51
1.4.5　两比特门 …… 52
1.4.6　单原子量子计算可扩展架构 …… 54

1.5 总结与展望 …… 55
参考文献 …… 55

2 团簇科学中的原子制造 …… 63
2.1 团簇束流的产生与测控 …… 63
2.1.1 气相团簇生长的理论理解 …… 63
2.1.2 典型团簇束源的设计 …… 70
2.1.3 总结与近期发展 …… 80
2.2 金属碳团簇的束流原子制造 …… 81
2.2.1 金属碳团簇的研究方法 …… 81
2.2.2 金属碳化物原子制造的典型案例 …… 84
2.3 团簇的宏量合成 …… 94
2.3.1 典型的金属团簇合成 …… 94
2.3.2 典型的半导体团簇合成 …… 95
2.3.3 内嵌富勒烯的合成 …… 96
2.4 团簇结构与物性的原子操控 …… 101
2.4.1 团簇结构与电子结构的演化与原子操控 …… 101
2.4.2 钨铜合金新结构物相 …… 105
2.4.3 金属-绝缘体转变 …… 107
2.4.4 类分子的光激发效应 …… 108
2.4.5 金属等离激元的三阶段过渡 …… 110
2.4.6 颗粒磁性的原子操控 …… 112
2.4.7 团簇催化的原子操控 …… 114
2.5 基于单个团簇的电子器件 …… 116
2.5.1 器件基本结构及制备技术 …… 116
2.5.2 器件基本输运现象 …… 117
2.5.3 驻极体效应及原子级存储器件 …… 119
2.5.4 电控单原子磁性 …… 121
2.5.5 多态随机比特与矩阵乘法的演示 …… 123
2.6 基于气体团簇束流的表面超精密加工 …… 124
2.6.1 气体团簇离子束研究历史 …… 124
2.6.2 GCIB 产生原理与典型装置 …… 126
2.6.3 GCIB 与材料的作用 …… 128
2.6.4 质选 GCIB 的原子级加工 …… 129
2.7 总结与展望 …… 132
参考文献 …… 132

3 基于二维材料的原子制造 …… 156
3.1 二维材料概述 …… 156

3.1.1　二维材料的定义……156
3.1.2　二维材料的发展历程……156
3.1.3　二维材料的基本结构……163
3.1.4　二维材料的物理性质……169
3.2　二维材料的面内掺杂原子制造……179
3.2.1　元素掺杂二维材料的制造……179
3.2.2　均相合金二维材料的制造……186
3.3　二维材料的面内单晶原子制造……195
3.3.1　单核生长实现单晶制造……195
3.3.2　周期势诱导单晶制造……202
3.3.3　表面结构诱导单晶制造……208
3.4　二维材料的面外堆垛原子制造……216
3.4.1　少层二维材料的外延生长……216
3.4.2　厚层二维材料的连续制造……228
3.4.3　叠层二维材料的堆垛控制……237
3.5　二维材料的异质结构原子制造……246
3.5.1　面内异质结构的原子制造……246
3.5.2　面外异质结构的原子制造……252
3.6　总结与展望……260
参考文献……263

4　基于薄膜生长的原子级制造……277
4.1　过渡金属氧化物的介绍……277
4.1.1　过渡金属氧化物的结构和自由度……278
4.1.2　过渡金属氧化物中的序参量及功能物性……280
4.2　过渡金属氧化物的原子级制造……281
4.2.1　原子层制造：分子束外延与激光分子束外延……281
4.2.2　原子级自支撑薄膜制备……288
4.2.3　过渡金属氧化物功能基元的原子级制造：离子调控……292
4.2.4　过渡金属氧化物的高通量制备：原子组合制造……295
4.3　原子级制造材料/结构中的新物性……299
4.3.1　氧化物异质界面的二维电子气及应用……300
4.3.2　过渡金属氧化物异质界面的界面磁性……307
4.3.3　铜氧化物的二维界面超导……316
4.3.4　过渡金属氧化物自支撑薄膜制备、调控和应用……320
4.4　过渡金属氧化物功能基元的离子调控……327
4.4.1　基于离子液体的离子调控……327
4.4.2　过渡金属氧化物的离子调控在电子器件领域中的应用……334

4.4.3　过渡金属氧化物的离子调控在磁性调控及磁电耦合中的应用……344
4.4.4　功能氧化物的新型离子操控方法的探索和发展……351
4.5　总结与展望……356
参考文献……356

5　原子级可控组装制造……374
5.1　核酸基元的合成……374
5.1.1　寡核苷酸的化学合成……375
5.1.2　寡核苷酸的酶法合成……377
5.1.3　基于细菌体系的生物合成……379
5.2　DNA 纳米技术和框架核酸……381
5.2.1　DNA 瓦片……381
5.2.2　DNA 折纸……385
5.2.3　跨尺度 DNA 结构制造……388
5.3　核酸介导金属材料的原子制造……393
5.3.1　离散型金属结构……394
5.3.2　连续型金属结构……397
5.3.3　连续型金属结构的电学性能测试……402
5.4　核酸介导绝缘材料的原子制造……405
5.4.1　传统制备方法……406
5.4.2　核酸介导的绝缘材料制备……407
5.5　核酸介导半导体材料的原子制造……413
5.5.1　核酸介导的半导体材料刻蚀……414
5.5.2　核酸介导的半导体材料组装……418
5.6　核酸介导的高性能半导体器件原子制造……421
5.6.1　晶体管介绍……421
5.6.2　核酸介导的半导体界面修饰……422
5.6.3　核酸介导制造半导体器件……424
5.7　点击组装与原子基元的模块化构建……427
5.7.1　点击化学反应……427
5.7.2　基于叠氮–炔点击化学的原子制造……430
5.7.3　基于 Diels-Alder 点击反应的原子制造……435
5.7.4　基于硫醇–烯/炔点击化学的原子制造……445
5.7.5　基于 SuFEx 点击化学的原子制造……451
5.7.6　光点击化学与原子制造……454
5.7.7　非共价键点击化学与原子模块化制造……459
5.8　点击组装在材料原子制造中的应用……462
5.8.1　点击组装介导拓扑高分子的原子制造……462

5.8.2　点击组装介导表界面的原子制造……469
5.8.3　点击组装介导核酸及 DNA/RNA 的原子制造……473
5.8.4　点击组装介导蛋白质的原子制造……477
5.9　总结与展望……483
参考文献……484

6　逼近原子水平的超精密加工……517
6.1　减材制造……517
6.1.1　原子级切削……518
6.1.2　基于探针的加工方法……522
6.1.3　基于能量束的原子级去除……531
6.1.4　原子级刻蚀去除……536
6.2　增材制造……538
6.3　等材制造……545
6.3.1　原子级缺陷调控……545
6.3.2　原子级材料连接……553
6.3.3　原子级精度操控……557
6.3.4　原子级组分调控……559
6.3.5　原子级表面重构……559
6.4　总结与展望……562
参考文献……563

7　原子制造中的表征与测量……570
7.1　透射电子显微镜技术……571
7.1.1　透射电子显微镜的主要结构……571
7.1.2　透射电子显微镜的工作原理……573
7.1.3　透射电子显微镜的附加功能……574
7.1.4　扫描透射电子显微镜在原子级表征中的应用……578
7.2　拉曼光谱和等离激元增强红外吸收光谱技术……591
7.2.1　表面增强拉曼光谱……592
7.2.2　针尖增强拉曼光谱……595
7.2.3　等离激元增强红外吸收光谱……598
7.3　超快动态电子学表征技术……605
7.3.1　超快透射电子显微镜……605
7.3.2　超快扫描电子显微镜……612
7.4　超分辨成像技术……619
7.4.1　受激辐射损耗(STED)超分辨技术……619
7.4.2　基态损耗(GSD)显微成像技术……620
7.5　超精密激光干涉测量技术……624

7.5.1　超精密激光干涉测量仪器的总体情况……624
7.5.2　超精密激光干涉测量仪器研发概况……625
7.5.3　超精密激光干涉测量仪器应用概况……626
7.5.4　亚埃级激光干涉测量技术与仪器展望……628
7.6　总结与展望……628
参考文献……629

8　原子制造计算的若干考虑……638
8.1　单原子操控的相互作用理论……638
8.1.1　扫描探针显微镜与单原子操控和选键化学过程……638
8.1.2　聚焦电子束与单原子控制……644
8.1.3　物理场囚禁和化学场操控……647
8.2　材料大规模创制……651
8.2.1　化学场(化学气氛)的分子动力学模拟……651
8.2.2　基于化学势调控和缺陷的新材料创制理论……652
8.2.3　基于算法的新结构预测……653
8.3　多尺度模拟和工艺仿真……656
8.3.1　二维材料构筑过程的模拟仿真……656
8.3.2　原子尺度模拟……657
8.3.3　介观尺度仿真……661
8.4　数据库构建和机器学习模型……662
8.4.1　二维材料数据库……662
8.4.2　二维材料理论预测的局限性……663
8.4.3　二维材料的机器学习预测……664
8.5　总结与展望……667
参考文献……668

9　原子制造中的若干理论问题……678
9.1　原子制造体系的新特征、新原理与新理论……681
9.2　孤立原子点缺陷体系的应用……686
9.2.1　金刚石氮-空位中心体系……688
9.2.2　硅片中的磷(^{31}P)原子带电中心……691
9.2.3　MoS_2单分子膜的空位缺陷……692
9.3　原子系综的物态调控与功能器件……693
9.3.1　冷原子系综……693
9.3.2　里德伯原子……694
9.3.3　碱金属原子……703
9.3.4　NV 系综……704
9.4　新型低维原子制造材料的发展……705

参考文献 ……713

10 展望 ……717
10.1 梦想与当前 ……717
10.2 原子制造：从原子到产品 ……717
10.2.1 从原子到分子 ……717
10.2.2 从原子层到异质结材料 ……717
10.2.3 从单原子中心到量子芯片 ……718
10.2.4 从原子零件到“智能”系统 ……718
10.3 原子制造与原子操控 ……718
10.4 人类走出地球要带什么？ ……719

扫码查看本书彩图

0 绪　论

原子制造是一种集原子级精确操控、原子级完美结构构建与原子级定制化物性调控于一体的极限制造技术。它源于物质科学、机械工程、信息科学、材料科学以及生命科学在原子尺度上的深度交叉融合，代表了人类在材料研发与先进制造领域发展的必然方向，已成为近年来国内外学术界、产业界和技术界共同关注的前沿热点之一。本章将综述原子制造概念的起源及其在国内外的发展脉络，系统阐述其核心特征与关键技术路径，明确原子制造的研究范畴与体系框架，并对其未来发展趋势进行展望。

0.1　原子制造发展背景

人类对物质世界的操控能力，从根本上决定了其利用和改造自然的能力，并深刻塑造了人类制造技术的发展形态。自原始社会以来，人类便开始认识宏观材料与物态的力学与热学等特性，并逐步开展了对宏观尺寸物体的主动加工与制造。随着牛顿力学和热力学基本定律的建立，人类对物质世界的理解不断深入，由此构建起至今仍被广泛依赖的各种机械系统和动力体系。在此基础上，人类逐渐掌握了对亚毫米和微米尺度物质的测量和控制能力。超精密加工技术的发展催生了介观制造与微米制造，推动制造业实现跨越式进步，深刻改变了工业体系与社会生活方式。而随着量子力学和半导体物理的发展，人类对物质世界的操控能力全面达到纳米水平，物理、化学、机械、电子和材料的综合运用实现了纳米尺度集成电路的制造，将人类带进了信息社会。如今，人类先进制程的最小特征尺寸已突破 10 nm，正迅速向亚纳米尺度迈进。这一趋势引发了一个根本性问题：我们的测量与控制能力，是否终将触及常规物质世界的基本单元——原子？继而能否真正实现从单个原子出发，精准操控原子构筑全新的人工物质、材料与器件？

原子制造相关的学术思想是随着人类对物质世界认识的不断深入，逐步孕育并发展起来的。早在古希腊和中国春秋时期，先哲们便已开始思考构成物质世界的最基本单元原子的存在，提出了朴素而富有远见的原子观。进入 19 世纪后，科学的发展使人类对原子的认识日益系统化和实证化。1911 年，卢瑟福基于 α 粒子散射实验的结果，提出了原子的有核模型，首次准确揭示了原子的内部结构，标志着人类正式迈入从原子尺度理解物质世界的新纪元。在此基础上，科学研究沿着两条主线不断推进：一方面，科学家深入探索原子内部结构，相继发现了质子、中子以及一系列基本粒子，逐步建立起现代原子物理和粒子物理的理论框架；另一方面，通过对各类物理与化学过程的细致剖析，人们逐渐认识到宏观世界中的各种现象——从物质相变到化学反应——本质上都是微观原子结构及其电子排布变化的外在表现。这些深刻的认知不仅推动了近代物质科学的形成，也奠定了精确操控原子、调控原子间相互作用的理论基础，为原子制造技术的诞生与发展提供了坚实的科学支撑。

20 世纪五六十年代，人类开始意识到通过主动操控原子来构建宏观功能与现象的可能性，这标志着原子操控思想与技术的初步萌芽。1959 年，诺贝尔物理学奖得主理查德·费曼(Richard Feynman)在其著名演讲《底部还有很大空间》(*There's Plenty of Room at the Bottom*)中提出可将单个原子作为信息存储单元用以容纳整部《不列颠百科全书》(*Encyclopaedia Britannica*)的设想，展现了原子尺度操作的巨大潜力，并提出在原子级工作(do thing on atomic level)实现物理式合成的终极(ultimate)能力。1969 年，另一位诺贝尔物理学奖得主阿瑟·阿什金(Arthur Ashkin)进一步探索了利用光压产生力场来操控物质甚至捕获和移动单个原子的可能性，为后续光学操控技术奠定了基础。然而，真正实现对单个原子的可视化与可控操纵，直到 20 世纪 80 年代才取得突破性进展。扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope，STM)的发明使科学家首次能够“看见”原子，并在表面上精确地移动它们，开启了原子级操控的新纪元。在此后的几十年里，一系列先进的原子操控技术相继涌现，包括团簇束流筛选、激光囚禁、原子级精确组装、原子层沉积与外延生长、单离子注入等，极大拓展了人类在微观尺度上构建物质的能力，也深化了对“原子制造”这一愿景的认知与信心。1986 年，美国著名科幻作家兼科学家埃里克·德雷克斯勒(Eric Drexler)及其创立的前瞻研究所(Foresight Institute)前瞻性地提出了“原子精度制造”(atomically precise manufacturing，APM)的概念。他指出，这种能够在原子级别上精准控制物质合成的技术，有望彻底变革制造业，并将其与通用人工智能并列为将深刻影响人类未来发展的两大核心技术之一。这一构想不仅激发了科学界的广泛思考，也为纳米科技与分子制造的发展提供了深远的思想指引。

然而，从原子操控到实际制造，相关技术在效率、产率和规模化方面长期存在显著差距。直到近年来，随着基础理论、精密仪器与材料科学的不断成熟，人们才逐步开始尝试突破这些瓶颈，推动原子操控向面向制造的应用研究迈进。2015 年，美国国防高级研究计划局(DARPA)启动了“从原子到产品”(atom to product)重大项目，旨在打通从原子尺度的微观材料到宏观功能器件之间的制造鸿沟，并实现微观特性的宏观继承与集成。该项目虽以纳米颗粒组装为核心研究方向，但也涵盖了原子级光刻等关键技术的初步探索。2018 年，美国能源部先进制造办公室加大投入，重点支持原子精度制造相关研究，标志着美国在该领域的布局正式上升为国家层面的系统性战略行动。2022 年，美国发布的《先进制造业国家战略》进一步明确指出，面对集成电路日益提升的复杂度与分辨率需求，发展原子精度制造技术已成为当务之急；同时强调，原子级制造将在推动微电子与半导体产业创新发展中发挥关键支撑作用。与此同时，日本也在 2018 年提出了“皮米级加工计划”(pico-meter manufacturing initiative)，致力于实现亚纳米尺度的极致制造能力，彰显出全球科技强国在这一前沿领域展开战略布局的共识与紧迫感。

早在 20 世纪 80 年代，国内便已启动原子操控技术的基础研究。而物理科学领域的研究人员也几乎与国际同步，开始探索通过操控原子构建人工结构的可能路径。相关文献显示，到了 90 年代，机械制造领域的学者提出了关于原子尺度操作的初步构想。物理、化学、材料、信息和机械等多个学科的研究人员纷纷将原子操控制造技术视为重要的前沿方向。然而，受限于当时原子操控在效率与功能上的不足，我国长期未能在国家层面系统性地布局原子制造的研究体系。直至 2016 年，国家开始组织笔者这一批青年专

家，着手制定原子制造科学技术的发展规划，标志着从顶层设计推动该领域系统性科学研究的起步。2018 年，中国科学院迅速启动了面向原子制造前沿问题的先导 B 类专项计划，进一步加速了基础探索与技术突破。此后，科技部、国家自然科学基金委员会、中国工程院以及华为等具有代表性的高科技企业相继关注并投入相关研究工作。在中国科学院关于原子、分子与团簇物理等方向的学科发展规划中，原子制造被明确列为关键前沿发展方向之一。部分省市也将原子制造平台建设纳入重大科技基础设施布局。2022 年，在中国科协发布的十大科学问题中，有两个与原子制造有关：一是信息器件的原子级制造，二是表面的原子级去除技术。同年，中国工程院发布的《全球工程前沿 2022》报告中，“原子尺度集成电路制造”与“光学元件原子及近原子尺度制造与测量技术”入选信息电子工程领域的十大研究与开发前沿。科技部、工业和信息化部亦开始着手制定专项发展规划，推动技术体系化发展。2023 年，国家自然科学基金委先后举办“原子制造的物质科学基础”战略研讨论坛和“原子级制造的基础研究”双清论坛，引发学界广泛响应。与此同时，高端制造、纳米科技等相关领域的学术会议普遍将原子制造列为重点关注的十大科学与技术问题之一。2024 年，我国成立了“原子级制造百人会”与“原子级制造创新发展联盟”，汇聚产学研多方力量，推动协同创新。2025 年，原子(级)制造在国内的关注度持续升温，工业和信息化部、国家自然科学基金委正积极研究设立重大科研专项，旨在全面支撑原子级制造的基础研究、关键技术攻关与未来应用转化，标志着我国在这一战略前沿领域正加快步伐，迈向系统化、规模化发展的新阶段。

0.2　原子制造基本概念与核心特征

0.2.1　原子制造基本概念

原子制造是指通过精确操控单个原子或原子级基本单元(基元)自下而上地进行材料、器件与系统构建的制造技术体系。它不同于传统的化学合成，也区别于近原子尺度的加工技术，亦不是基于人工原子、纳米颗粒等的制造方法，其核心在于实现原子级别的精准控制与可控组装。

此处的原子级基元，指的是在某一自由度上原子数目可精确计数且物理化学性质可精准调控的最小功能单元，包括可控的单原子、原子团簇、二维原子层以及原子级平整的表界面等。从物性特征来看，纳米级功能基元本质上仍是块体材料的尺度缩小版本，而原子级基元则呈现出质的飞跃。例如，体相铜为典型的金属导体，纳米铜虽尺寸减小但仍保持金属性，仅表现为比表面积显著增大的金属；而当铜以原子数目精确可控的团簇形式存在时，则可能呈现绝缘体特性，且每增加一个原子都会显著调制其 HOMO-LUMO 能隙。所谓“基于原子特征物性创制宏观材料”，在此例中即指通过可控组装这些具有特定电子结构的铜团簇，实现可规模化制备、可加工的新型绝缘态铜基材料。由于原子级体系蕴含极为丰富的物性维度，由此构建的新型材料往往展现出前所未有的性能极限：通过逐个原子的精确优化，可实现材料能量/荷载效率的理论极限；将器件尺度压缩至原子级别，有望达成芯片集成度的终极边界；原子级无缺陷的完美结构可赋予材

料接近理论强度的极致力学性能；对原子状态的精准操控能够实现超高灵敏的感知响应；而孤立原子所形成的自旋中心则具备优异的量子相干性，为量子信息技术提供理想载体。原子制造的核心正是将这些独特的原子级特征物性逐层传递并集成至宏观器件之中，从而实现性能的跨越式提升。

近年来，本领域涌现出诸多相关概念，如原子制造、原子级制造、原子特征制造、原子精度加工、原子与近原子尺度制造等。由于实际应用中的交叉性和发展初期的模糊性，这些术语常被混用，仅在具体语境中略有侧重。严格而言，原子级制造是指通过规模化原子精准操控，将制造尺度精确推进到原子或原子级基元水平，使物性逼近理论极限的制造技术体系。该范畴覆盖了原子制造，还包括大量自上而下原子级加工的内容，其关系如图 0.2.1 所示。原子制造是原子级制造中最具前瞻性与革命性的方向：它强调从下而上直接操纵单个原子，重构物质结构，实现材料的“再创造”，有望在未来彻底改变先进制造范式与物质科学的基础逻辑。可以说，原子精度制造、原子尺度制造等概念均可被纳入广义的原子级制造范畴。本书以总结自下而上的原子制造技术发展为主线，同时也将适当涵盖部分通用的原子级制造内容，旨在系统梳理这一前沿领域的演进脉络与关键挑战。

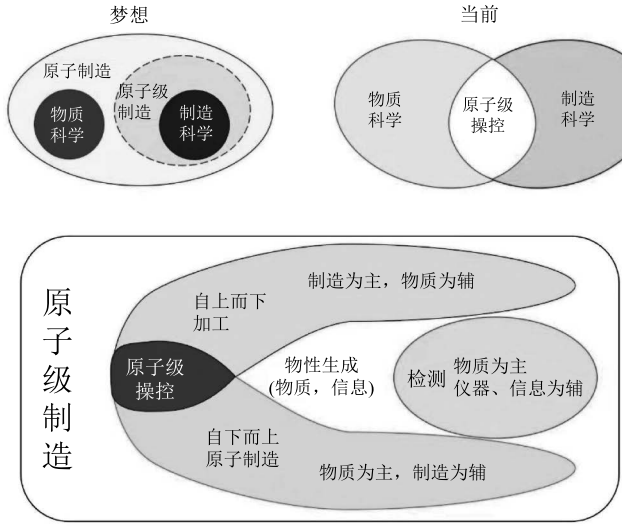
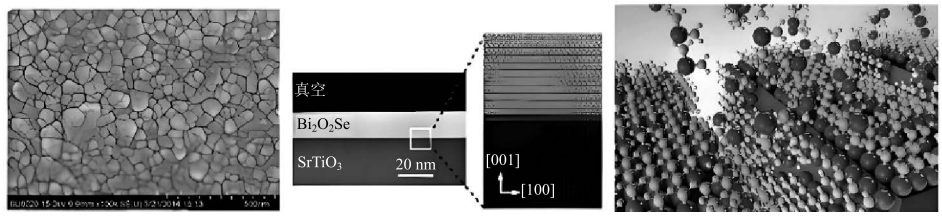


图 0.2.1　原子制造相关概念范畴

原子制造、原子级制造不是亚纳米制造，但这三者之间存在密切的递进与交叉关系。我们可以借助薄膜沉积(图 0.2.2)这一典型工艺来厘清它们之间的区别与联系。纳米制造通常指在 1~100 nm 尺度上进行材料加工与结构构建的技术体系，例如利用磁控溅射在基板上制备纳米薄膜。在此框架下，通过优化工艺参数(如溅射功率、气压、时间等)，虽未突破原有技术原理，仍可实现亚纳米级别的薄膜厚度控制或表面粗糙度优于 0.1 nm 的高精度膜层。这种能力可视为纳米制造向更高精度延伸的结果，即“亚纳米制造”——它本质上仍是纳米制造范畴内的性能提升，属于量变而非质变。而原子制造则代表了根本

性的技术跃迁。以分子束外延为例，该技术突破了传统镀膜的统计性生长模式，引入了层状生长模型，并结合原位反射高能电子衍射实现单原子层的精确调控。此时，薄膜生长以“单层”为单位进行控制，达到真正的原子级精度。这种基于全新物理机制与实时反馈控制的制造方式，创造了一批前所未有的物质和材料，标志着从“近原子精度”迈向“原子分辨”的跨越，是对传统纳米制造范式的颠覆。因此，可以这样理解它们的关系：亚纳米制造是纳米制造在精度上的极致延伸，仍在原有技术框架内通过参数优化实现；原子制造则依赖新原理、新方法，实现对单个原子或原子层的可控操纵，是制造精度的革命性突破；二者都追求超越传统纳米尺度的控制能力，但原子制造代表的是质的飞跃。值得注意的是，尽管原子制造在精度和器件性能极限探索方面具有无可比拟的优势，但它并不能全面取代纳米制造或宏观制造。在实际应用中，如芯片制造流程包含数百甚至上千道工序，其中绝大多数仍依赖高效、稳定的纳米制造技术；只有少数关键步骤(如界面控制、超薄栅介质生长、量子结构构筑等)需要采用原子制造工艺。这些关键环节往往决定了器件的整体性能，成为技术突破的“卡脖子”所在。综上所述，亚纳米制造是纳米制造的高精度形态，而原子制造则是其深层次演进与范式革新。它们共同构成了从纳米到原子尺度逐级提升的先进制造图景，在未来高科技产业中各司其职、协同发力。



磁控溅射
获得纳米厚度薄膜

分子束外延
晶格匹配获得原子层控制能力

原子层沉积
自限制效应突破曲面原子级控制能力

图 0.2.2　亚纳米、原子精度的薄膜生长

0.2.2　核心技术特征——原子精准操控

原子精准操控是原子制造最核心、最基础的技术特征，是指聚焦单个原子或特定数量的原子基元，对其状态、位置、排列及成键结构等进行精准调控。这种操控远超传统的探针式操作，是一种高度可控、可重复、可编程的原子级干预手段。所谓原子制造，正是通过规模化、系统化地实施原子精准操控，按照设计需求自主构筑原子尺度的结构单元，进而实现材料物性的按需定制，并批量生产具有原子级特征的颠覆性功能产品的制造技术体系。由于原子是构成物质世界的基本单元，原子制造因而具备对物质结构与性能最底层的创造能力。相较于其他制造技术，它不仅在空间分辨率上达到极限，更在性能调控的根源上实现了根本性突破。正因如此，原子制造有望成为引领未来科技革命的关键核心技术，在信息、能源、生命科学等领域催生前所未有的变革。

也许读者会问，原子制造和传统化学合成有什么不同？简而言之，化学合成告诉我们物质“喜欢”如何结合，我们顺势而为；原子制造则要求物质“必须”按照我们设计

的蓝图结合，我们逆势而创。在未来，两者的边界将越来越模糊，共同构成人类在原子尺度上创造新物质、新文明的基石。当然，在目前的初级阶段，基于精准操控的原子制造和一般意义上的批量化学合成显得分裂甚至矛盾，仿佛是走向物质科学终极目标的两条路径。可能有学者认为，当今的化学合成就已经实现原子级的自由了，没必要追求对逐个原子/基元的操控。但实际上，精确操控一个原子，反而可能成为未来自由原子制造的练功石和关键路径。这就像杨过练习“天罗地网势”，先要精准定位一只麻雀，然后才是批量处理一群麻雀，最终才能自由处理任意麻雀。

抓住原子精准操控这一核心主线，我们便能够系统地追踪并梳理原子制造技术的发展脉络。目前，人类已发展出多种实现原子级精准操控的技术手段，如原子分子束技术、扫描探针技术、团簇束流技术、配体包覆策略以及原子/离子囚禁技术等。这些技术，连同以其为基础衍生出的原子及其产物的检测方法、工艺效率优化方案以及面向应用的产品设计，共同构建起原子制造的技术体系。

那么，如何从原子操控迈向真正的原子制造？在制造领域，大规模化与高一致性被公认为制造技术的核心特征。以此为标尺来审视当前原子制造的发展水平，可以发现：原子精准操控有望将产品性能的均一性提升至原子级的前所未有的高度；然而，宏量制备能力仍是制约其走向实际应用的主要瓶颈。若以传统制造业对产量的标准来衡量，当前多数原子操控技术的产出效率仍远未达标。因此，实现原子“制造”，关键在于突破高效、可扩展的原子操纵与集成技术。

可喜的是，经过几十年发展，上述原子操控技术已有很大进步。STM 除了被用于观察原子分辨的图像，还被用来操控原子、分子，以绘制原子图案、制造量子围栏，从而写出各种原子图案。我国科学家也以此方法写出“中国”二字(图 0.2.3(a))。近年来，人们已能在小时量级的时间内搬动近百个原子完成这类工作[1]。美国甚至开发出了 0.7 nm 线宽精度的光刻样机(图 0.2.3(b))。超冷原子技术近年来发展迅猛，已能够实现对原子自由度的极致操控。通过将原子冷却至纳开尔文(nK)甚至更低的温度，并利用激光在真空中精确操控这些超冷原子，科学家不仅可以将其束缚并组合成分子，还能构建出高度有序的人工晶格结构。近期，研究者甚至利用该技术成功搭建出形似“埃菲尔铁塔”的微纳结构，充分展示了其在精密构造方面的潜力。同时，这一技术也为高灵敏度的光学器件和原子器件的实现提供了强有力的支持，推动了量子模拟、精密测量等领域的快速发展(图 0.2.4)[2]。人们还发展了超快超强光场技术，突破了原本电子绕原子运转的周期，提供了对原子周围的电子进行操控的手段。人们不但可以控制原子团簇中原子的种类和数量，还能通过控制外界条件控制团簇的原子结构，由此得到全新的人工分子和物质。人们可以制备原子线和原子层，并且操控这些原子层堆叠出全新的异质结、构造各种器件。人们能够操控配体分子、固体中的单个功能原子以及单原子缺陷，进而探索实现单原子级存储、逻辑运算和传感器件的途径[3]。DNA 折纸术也具有控制包含单个功能原子的配体的精确组装能力，樊春海和柳华杰团队[4]利用这一技术获得含单个功能铁原子的分子写成的“五星红旗”图案(图 0.2.3(c))，13 个铁原子组成“红旗”上面的“五星”清晰可见。特别值得指出的是，这一技术每批次可以制造 10^{11} 个以上“红旗”图案，显示出原子微结构和器件大批量制造的潜力。

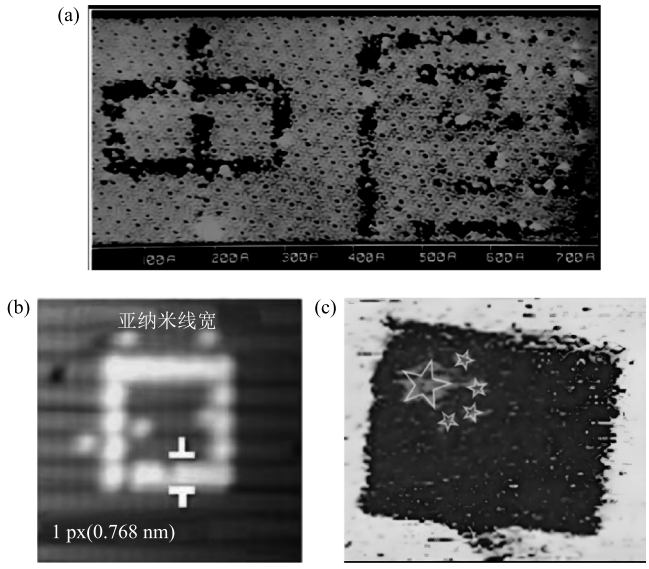


图 0.2.3　(a) 1993 年，扫描针尖操控原子写“中国”二字[1]；(b) 美国 0.7 nm 线宽图案；(c) 2019 年，基于 DNA 折纸术制作的五星红旗图案[4]

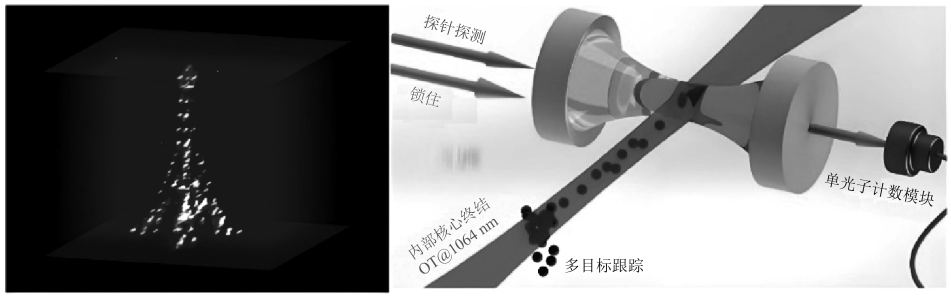


图 0.2.4　冷原子制造的埃菲尔铁塔(Laboratoire Charles Fabry at Institut d’Optique)和基于原子–微腔耦合构建单向传输特性的光隔离器件[2]

还要考虑到，“宏量”的数值定义由实现产品功能的需求具体决定，原子制造的产品性能核心指标有望比传统产品提升很多数量级，这使其宏量生产的数值要求迅速下降。而另外一方面，经过几十年的发展，上述原子操控技术处理规模已有显著提高，种类包括原子团簇(简称团簇)束流、多针尖技术、程控组装、冷原子光晶格等，且逐渐能满足一些产品功能的需求。可以说，如今我们已经快要迈入初级原子制造的门槛。

有一个事实必须澄清，那就是，原子操控技术一定是低效的吗？实际上，低效的印象源于逐个搬迁原子的技术。若把这一印象当作事实，就犯了混淆针对质(逐一控制的精度)和针对量(平行操控的线程数量)的错误。以团簇束流为例，尽管控制单个团簇中原子数的是极为精细的操作，但是从团簇的整体数量来看，我们已经能够实现每秒 10^{12}~10^{13} 个的产额，这足以满足集成电路加工的需求。从这一角度来谈，我们寻求原子制造技术重要任务之一，或许正是探索“质”与“量”并举的创新途径。

0.2.3　产品效果特征——原子精确结构创制与颠覆性物性

原子制造并非仅仅是微纳制造在尺度上的简单缩小与延伸，更是一种具备颠覆性能力的全新制造范式——通过精准操控单个原子来构建物质。其直接产物涵盖人工分子和人工材料，突破了传统分子与晶体层次的材料限制，能够实现化学键的断裂与重构，依照设计需求精确组装出特定结构的分子与材料。这一技术将为物质科学带来海量前所未有的研究对象，极大拓展人类对物质世界的认知深度、控制精度与创造能力。同时，原子制造开启了材料与器件性能按需定制的新纪元，有望使关键性能指标实现数百乃至上千倍的跃升，推动科技与产业发生根本性变革。

以团簇为例说明其潜力。团簇是由少数原子组成的微观聚集体，是通过原子制造可以获得的产物之一。晶体具有长程序，所以原子必须以一、二、三、四和六次对称性排列，其种类是十分有限的。由少量原子堆积而成的团簇则不受长程序限制，“物种”数目会出现极大爆发，如 Au_{20} 团簇，图 0.2.5 列举了近年来它已被发现的同分异构体结构[5]。可以看出，该团簇中最低能量结构是金字塔型的，而非在宏观块体中占主导的面心立方堆积。原子制造能大量制备这种日常条件下不太稳定但具有全新结构和物性的新分子，为人工分子和物质的创制提供了重要手段。

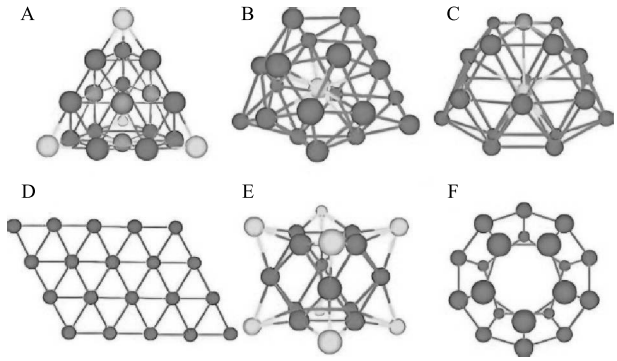


图 0.2.5　Au_{20} 团簇的同分异构体[5]

物质科学遵循一个基本原理：结构决定电子结构，后决定物性。原子作为构成常规物质世界的基本单元，其排列与相互作用决定了宏观材料的性能，呈现了原子调控的全新特征的电子结构。图 0.2.6 展示了原子电子结构、团簇电子结构以及原子核内核子结构的能级排布规律及其对应的幻数序列。可以明显观察到，团簇中的电子壳层排布虽源于原子轨道，但其整体模式更接近于原子核中核子的幻数特征，表现出类核壳层结构的行为。这一现象源于团簇内部自由电子在受限几何结构下的集体行为与重新分布。特别地，在某些特定尺寸的团簇中，轨道量子数不再严格受主量子数的束缚，导致低能轨道可容纳远超常规数量的电子，形成高度简并的电子态。研究表明，这种电子态密度的异常堆积类似于固体中费米面附近出现的范霍夫奇点，显著增强了电子间的配对相互作用，从而诱导出一个巨大的配对能隙。该能隙所对应的临界温度可达上百开尔文，展现出类高温超导的潜在特性。这一实例充分说明，通过原子尺度的精准制造，不仅可以调控材料

的原子构型，还能重塑其电子结构，最终实现对宏观物性的革命性设计与优化。原子制造因此展现出在原子构型、电子结构和功能物性三个层面的全面创制能力，为未来新材料的开发开辟了全新的路径。

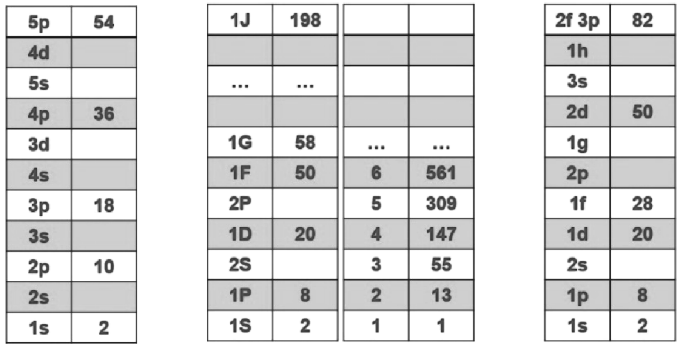


图 0.2.6　不同体系的幻数序列演化

近年来，二维原子层材料的兴起也为原子制造的创制性提供了一个绝佳案例。最近该领域有研究发现，存在 1000 多种可以自由剥离的原子层，如果将其有效地随意堆叠，五层原子层异质结就可以创造出 10^{15} 种新材料；如果考虑各层之间的角度关系，可创造出的新材料就更加难计其数。

我们分三个层次来介绍原子制造对产品性能的影响。最核心的，原子制造具有物性创制的能力。例如，在化工催化方面，金、铂块材基本没有化学活性，但若将其制成单原子或者团簇形式，则可从中观察到极大的二氧化碳催化效果[6]，此时再去合成有机物（如甲醇），将大幅度降低化工过程的能耗。而且，若能将活性原子中心协同组装制造原子微结构催化材料，还能进一步高效产生更复杂的化学品（如燃油、氨基酸和糖），用以支撑碳中和和地外环境改造的需求。再如，激光倍频晶体是我国“卡美国人脖子”的明星材料之一（如陈创天院士开发的 KBBF[7]晶体封锁美国长达 15 年）。二硫化钼晶体完全没有倍频性能，但是当材料到达单原子层，二硫化钼的单位厚度倍频效率就能飙升至 KBBF 晶体的上万倍；更进一步，若能设计原子层结构，其倍频效率将会随着层数平方式上涨，由此光学晶体能量转换效率将提高数万倍。这意味着可以用 1 μm 厚的原子层材料替代 1 cm 厚的当前晶体，从而推进激光定向能系统的微型化。再如，少原子的铂团簇具有磁性，与铂块材截然不同；铅岛的超导温度随着材料的原子层数发生奇偶振荡[8]；单层石墨的费米速度（决定载流子迁移率）比石墨块材高上百倍等。

其次，即使不考虑材料的彻底改变（也即创制），由于原子尺度再设计带来的量子效应，原子制造产品也能获得大量微纳制造产品不具备的新性能，并且蕴含着非线性的大幅超越现有材料器件性能的机会，使得原子制造产品获得优势。

这是因为，原子制造可以触及微纳制造通常不能触及的电子层次量子效应。这从由摩尔定律长期主导的微电子器件的发展即可看出。根据摩尔定律，器件特征尺寸的缩小意味着工作主频的提高。近几十年来，特征尺寸已从 10 μm 缩小到了 10 nm 附近，主频

也因此提高了几千倍。这些事实表明，主导器件工作的规律并未改变：10 nm 硅器件和 10 μm 器件一样，都遵循着经典物理，并未触及量子效应(这不能排除器件设计中有意回避量子效应的努力)。另外，很多电子量子效应的临界尺寸非常小。比如，我们曾经研究了金纳米颗粒的等离激元效应，这是一种电子的集体振荡模式，其从经典散射模式到量子修正模式的临界尺寸仅为 2~3 nm，如图 0.2.7 所示[9]。也就是说，直到 2023 年，大规模微纳制造仍未达到系统性触发这类量子效应的层次。类似的原子尺度物性在材料熔点、强度等核心性质中也有表现，如图 0.2.8 所示[10,11]。

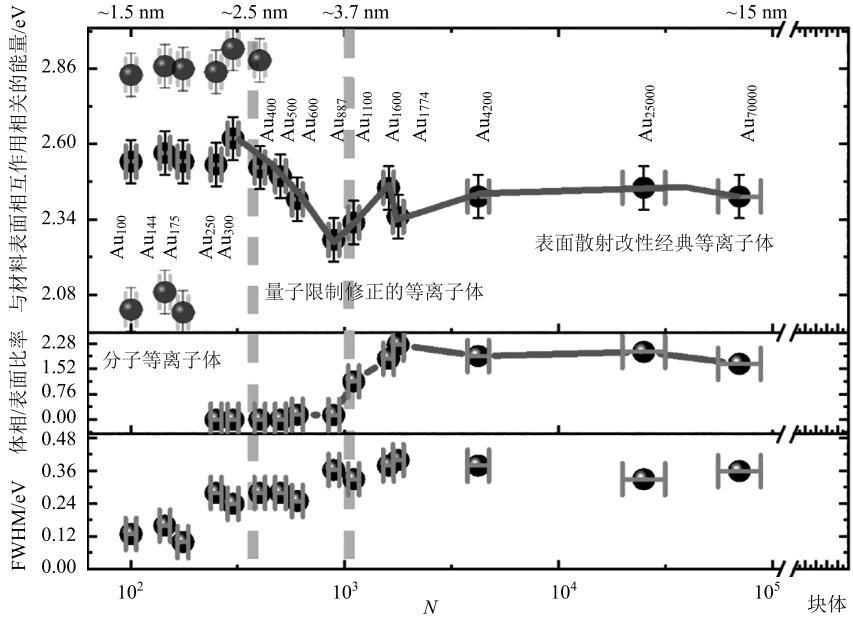


图 0.2.7　金等离激元随尺寸的演化[9]

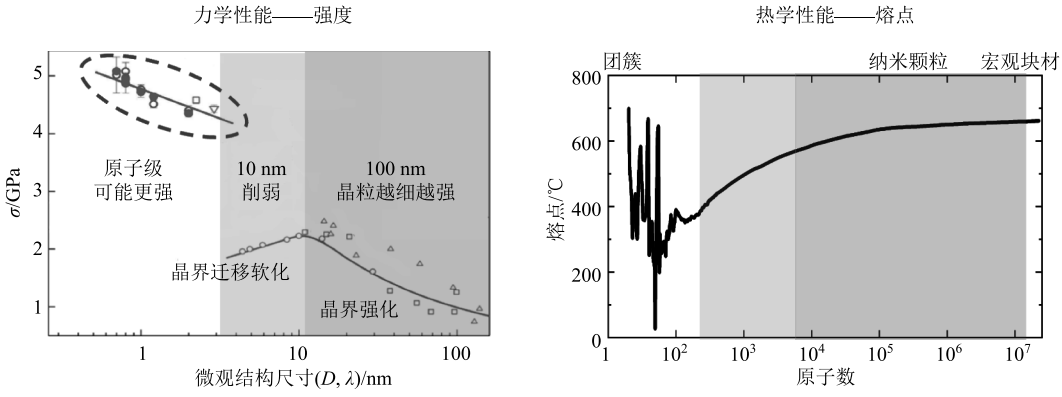


图 0.2.8　团簇尺度上物性随原子数的激烈调制[10,11]

另外，仅是做到原子精度的加工就会使器件获得巨大的性能提升。以惯导系统中的核心零部件石英半球谐振子为例，若能通过化学机械抛光技术实现原子级精度的平整，