

理化所一三五季报

2017 年第一季度

突破一 先进激光技术的创新与应用

概述：本方向本季度在研项目 17 项，其中新增 1 项，结题 1 项。

人才团队建设方面：拟引进光学专业博士 3 名、机械设计派遣人员 2 名，光路调节派遣 2 名；共召开 8 次调度会议。

（一）本方向本季度重要进展

本季度在大功率固体激光、钠信标、中红外变频固体激光和皮秒固体激光等方面取得重要进展。（略）

（二）下一步工作计划

下一步将继续在大功率固体激光、钠信标、中红外变频固体激光和皮秒固体激光等方面开展相关工作。（略）

突破二 液氮温区 KJ 制冷技术创新及其应用

概述：本方向本季度在研项目 5 项；共召开 6 次调度会议。

（一）本方向本季度重要进展

本季度在 KJ 长寿命制冷系统、20m 制冷机、型号用制冷机和小型制冷机等方面取得重要进展。（略）

（二）下一步工作计划

下一步将继续在 KJ 长寿命制冷系统、20m 制冷机、型号用制冷机和小型制冷机等方面开展相关工作。（略）

突破三 大型低温制冷系统技术研发及工程应用

概述：本方向本季度在研项目 1 项，即“液氮到超流氦温区大型低温制冷系统研制”项目，是中国科学院国家重大科研装备研制专项计划实施的项目之一，分为 6 个子方向。

（一）本方向本季度重要进展

1. 冷箱：完成 2500W@4.5K 和 500W@2K 两个冷箱中子部件的设计，签订研制合同，并开展冷箱整体集成设计。

2. 集成：开展 250W@4.5K 制冷机的调试优化实验，进一步完善控制程序，增设关键参数主界面，关键设备启动条件等；更换优化后的液氮低温传输管线，经试验测试运行状态良好。

（1）2500W@4.5K、500W@2K 制冷机的组装调试地点的确定：经中心技术委员会讨论并上报项目指挥部，项目指挥部于 2017 年 4 月 20 日下文，正式将 2500W@4.5K 系统组装调试现场设置在廊坊低温工程基地，集成方向负责廊坊基地改造和 2500W@4.5K 系统集成总体方案。

（2）2500W@4.5K 制冷机的室温真空循环泵组完成厂内的现场初步测试：包括泵组的外观和配置检查，手动运行模式测试，自动运行模式测试，系统故障响应测试等，现场各项测试运行正常并形成会议备忘录，进一步优化安全策略方案。

（3）2500W@4.5K 制冷机的室温气动调节阀完成相关测试：完成了整体加工和工厂配装，进行了现场内漏、外漏和定位器等相关厂内测试。

3. 流程设计：建立大型低温氦制冷系统的流程设计与动态仿真系统平台，完成制冷量为 2500W@4.5K 及 500W@2.0K 的液氮到超流氦温区大型低温制冷系统的流程设计与优化。

4. 冷压缩机：完成通流部分初步三维设计：设计工况下的 CFD 分析；进行叶轮初步强度分析，并结合强度计算结果和 CFD 计算结果对压缩机设计工况进行优化；结合 CFD 软件，对压缩机非设计工况进行优化，拓宽压缩机的流量覆盖范围和高效区范围。完成冷压缩机整机性能仿真（温度场分析）结果分析。完成蜗壳流道设计工作和叶轮初步结构设计工作。完成冷压缩机整机性能仿真设计与计算任务书和招标文件的准备工作。

5. 氮螺杆压缩机：针对 2500W@4.5K 滤油器与冰轮进行技术交流，完成测试系统方案，讨论形成补充协议。豪顿压缩机完成了主机空气试运转和水下泄漏试验。完成了三维布局图，均按节点进行。

6. 透平膨胀机：250W@4.5K 制冷机液氮杜瓦管改造后，重新对透平膨胀机的性能进行了测试，完成了 2500W 制冷机透平膨胀机的初步设计。

（二）下一步工作计划

1. 冷箱：250W@4.5K 系统方面，配合整体改造，开展冷箱内部换热器及二级透平入口温度调节结构的改造；2500W@4.5K 系统方面，开展 4.5k 冷箱内部集成设计和子部件研制。

2. 集成：250W@4.5K 制冷机的改造和优化实验；2500W@4.5K 制冷机集成方案以及关键设备包括：室温循环泵组现和气动调节阀门的厂家现场测试。

3. 流程设计：进一步完善 2500W@4.5K 低温制冷机的流程和 PID 设计，确定各部件参数；完成 2500W@4.5K 控制系统硬件的采购。

4. 冷压缩机：冷压缩机三级叶轮通流部分优化设计以及整机温度场仿真计算；高速电机和磁悬浮性能测试平台的验收和初步试验调

试；冷压缩机整机性能测试平台方案设计。

5. 氮螺杆压缩机：国产研制的压缩机主机和油分离器生产，进口压缩机整机氮检，滤油器外购件采购及零部件加工制造。

6. 透平膨胀机：加快实验平台的搭建、配合 250W@4.5K 制冷机的改造、推进 2500W@4.5K 透平膨胀机的设计。

突破四 仿生智能超浸润界面材料体系构筑与调控

概述：本方向本季度在研项目 42 项，其中新增 6 项。召开协调会议 3 次。在仿生超浸润界面材料体系构筑及应用、仿生纳米孔道能源材料与能源器件、仿生超浸润的有机微纳材料组装与器件、仿生粘附界面材料等方面展开了系统深入的研究，取得了一系列原创性研究成果，发表 SCI 论文 32 篇，其中包括 1 篇 *Angew. Chem. Int. Ed.* 和 5 篇 *Adv. Mater.*。

（一）本方向本季度重要进展

1. 仿生超浸润界面材料体系构筑及应用：构筑了基于交替亲疏水纳米畴的超双亲界面材料，并用于制备均一的功能性导电聚吡咯薄膜，对于有机/无机光电材料和器件的组装，如有机薄膜二极管、传感器、有机太阳能电池等具有重要意义（*Angew. Chem. Int. Ed.* **2017**, *56*, 5720-5724）。由于其水下对油滴的超低粘附力，赋予这种纳米复合物优异的抗血小板粘附和抗生物粘附的性质，在诸如经脉过滤器、冠脉支架、心房缺损封堵器件等医学领域具有广泛的应用前景（*Adv. Mater.* **2017**, *29*, DOI: 10.1002/ adma. 201602869）。

2. 仿生纳米孔道能源材料与能源器件：采用自下而上的自组装方法构筑了基于片层高岭土的两面体二维纳流控器件。这种二维纳米材料具有亚纳米和纳米两种尺度上的流体通道，展现了非常完美的阳离子选择性和极佳的极端化学条件下的稳定性。这种基于高岭土的二维膜的盐差发电能力与基于氧化石墨烯的二维膜盐差发电能力相当，但是基于高岭土的不对称膜能够产生更大的离子电流。为设计更加稳定、环境友好和价格低廉的离子选择性膜材料提供了一种新思路（*Adv. Mater.***2017**, 29, DOI: 10.1002/adma.201603652）。

3. 仿生超浸润的有机微纳材料组装与器件：利用超浸润界面“液桥限域组装”原理，制备了高质量的一维单晶及其纳米阵列，实现了高性能的 FP 模式和 WG 模式的激光发射。通过控制微米柱模板的尺寸，可以有效调控有机微腔的尺寸，从而不同模式激光的发射（*Adv. Mater.***2017**, 29, DOI: 10.1002/adma.201700177）。进一步利用此方法制备的高质量钙钛矿单晶阵列用于高性能光检测器，展现了很高的响应性和极快的响应速度（*Adv. Mater.***2017**, 29, DOI: 10.1002/adma.201605993）。

4. 仿生粘附界面材料：结合简单的室温下电化学去合金化技术与原位光聚合设计制备了具有多尺度结构的多孔镍钛合金/水凝胶纳米复合物。这种复合物兼具镍钛合金的硬度和水凝胶网络的柔性。微纳米尺度上的双重拓扑作用与分子水平上识别作用的协同效应极大提高了癌细胞在界面材料的粘附行为，为设计高效细胞识别材料和研究癌细胞表面性质提供了一种新方法（*ACS Appl.*

Mater.Interfaces**2017**, DOI: 10.1021/acsami.7b01147)。进一步地将响应性 PNIPAAm 聚合物刷引入到三维硅纳米线阵列表面,通过近红外光的热效应诱导光控的 PNIPAAm 聚合物涂层的亲疏水转变,从而实现癌细胞的光热控制的可逆粘附/去粘附。这种近红外光控的可逆稳定的智能体系将有助于进一步发展设计新型原位操纵的智能纳米器件 (Nano Res.**2017**, DOI:10.1007/s12274-017-1446-1)。

(二) 下一步工作计划

1. 围绕仿生超浸润智能界面材料体系,重点开展以下几方面的研究:聚焦仿生超浸润界面的关键科学问题,揭示多尺度(分子、纳米、微米)结构与化学组成对超浸润特性调控的静态微观机制,建立超浸润界面特性的普适性理论模型;从热力学动力学出发,探索智能响应超浸润界面体系中物质输运及能量转换的规律;阐明通过特异超浸润界面性能组合,创造特殊新功能界面材料体系的协同原理;建立超浸润界面化学的知识体系;发展超浸润材料性能、界面化学过程表征以及材料规模化制备的技术体系;完善超浸润界面材料表征的新型仪器设备与规模化制备的关键技术和工艺。

2. 围绕仿生纳米孔道能源材料与能源器件,重点开展以下几方面的研究:研究自然界中一些生物(如电鳗鱼)对清洁能源进行高效转换的本领,设计并制造具有刺激响应性,高离子/电荷选择性的智能通道体系,为仿生纳米通道的制备提供最基本的理论依据;研究对人造仿生通道能量转换材料及界面材料的控制,即从分子、分子簇拓展到纳米结构和微米结构,研究材料本身在宏观上产生的仿生离子选

择性和高效的输运特征。模拟生物体系的智能界面，仿生构筑在能量转换、传递和储存等高级功能上具有协同效应的新界面材料体系。

3. 围绕仿生超浸润的有机微纳材料组装与器件体系，着重从以下方面开展研究：利用超浸润界面“液桥限域组装”原理，控制液膜在微柱间破裂，从而构筑定向排列的微米级液桥阵列。每个液桥形成一个物理限域的一维空间，束缚内部的物质沿着液桥方向定向排列，从而形成精确定位的一维组装结构，发展零维纳米粒子（金纳米粒子组装成一维有序堆积结构，用于光波的方向性等离子共振传输），一维纳米线（油溶性高分子阵列用于制备场效应晶体管）以及二维纳米片（石墨烯薄片组装形成一维有序堆积结构，用于可弯曲柔性力学传感器）的可控制备和集成化光电功能器件的技术与装备。

4. 围绕仿生粘附界面材料体系，着重从以下几个方面开展研究：研究独特的生命界面体系表面粘附现象，揭示界面粘附的多尺度结构、化学组成与粘附性能的构效关系。为研究和建立多尺度界面粘附模型提供依据；制备仿生粘附可控的界面材料，研究水环境下细胞的动态识别粘附、抗粘附等性质，探索可用于癌细胞分离新技术，以期为恶性肿瘤的治疗提供新途径。

培育一 光化学转换与光化学合成

概述：本方向本季度在研项目 12 项；继续开展光化学转换与光化学合成研究工作，并在光化学合成方面取得了显著成果。

(一) 本方向本季度重要进展

1. 光催化制氢取得重要进展

(1) 利用自组装策略将量子点与铂纳米颗粒组装形成纳米网状结构,在保证量子点结构完整性的同时显著增强量子点到铂颗粒的电子转移。飞秒瞬态吸收光谱和时间分辨的 X-射线吸收光谱表明组装体中从量子点到铂颗粒的电子转移可以在皮秒时间尺度内完成,相比于扩散控制的体系有质的飞跃。基于这一优势,该体系可见光照下的产氢内量子效率为~65%,基于铂颗粒的产氢催化循环数可高达 $>1.64 \times 10^7$ 。相关研究结果发表在国际化学类顶级期刊《美国化学会志》“J. Am. Chem. Soc. 2017, 139 (13), 4789-4796”。同时,《物理化学学报》刊文对该工作进行了亮点评述,认为“这一研究策略极大提升了量子点人工光合成体系的效率,具有一定的普适性”(ActaPhys.-Chim. Sin. 2017, doi: 10.3866/ PKU.WHXB201704121)。

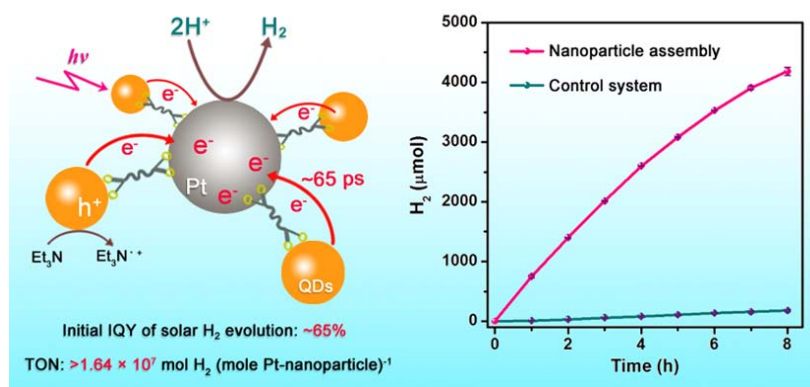


图1 自组装 Pt/QD 纳米网状结构增强可见光催化产氢

(2) 成功通过乳液自组装的方法制备了一系列不同 Au 尺寸与含量的 Au/CdSe 纳米晶团簇 (NCs), 研究表明该合成方法不仅可以保留组成单元的原有物理化学性质, 同时还可通过组装调控 Au 尺寸和含量来有效增强 Au 的局域表面等离子体共振对 CdSe 量子点的电荷

分离及光催化产氢活性的影响。最终 Au/CdSe 组装体表现出极高的可见光催化产氢活性($73 \text{ mmol g}_{\text{CdSe}}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 约为 CdSe 组装体的 10 倍), 且具有良好的催化稳定性 ($>50 \text{ h}$)。相关研究工作以通讯形式发表在国际材料领域顶级期刊《先进材料》上 (Adv. Mater., 2017, DOI: 10.1002/adfm.201700803)。

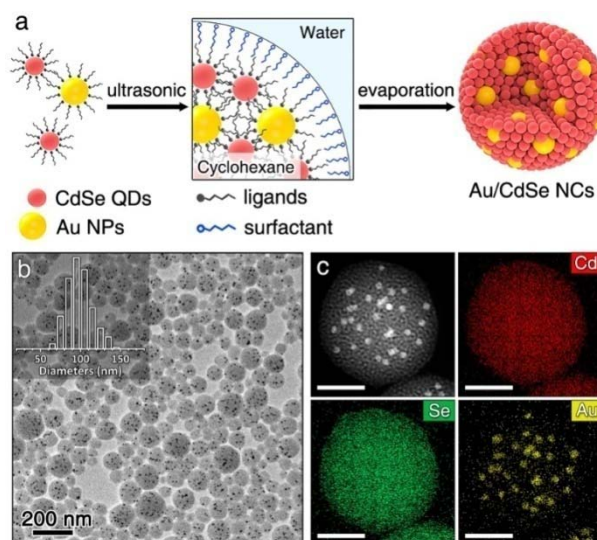


图2 Au/CdSe 纳米晶团簇组装体的组装过程示意及结构表征

2. 光化学合成取得重要进展

(1) 利用巯基乙酸保护的溶胶 CdSe 量子点作为光敏剂, 廉价镍盐作为产氢催化剂, 实现了一系列苄醇的脱氢反应。当底物中含多个羟基时, 苄位的羟基优先被氧化, 可以高选择性得到相应的醛酮化合物。此反应无需任何的电子牺牲剂、外部助催化剂、氧化剂, 反应唯一副产物为氢气, 原子经济性高。通过同位素效应电子顺磁共振、X 射线光电子能谱分析等手段证实 CdSe QDs 表面的巯基乙酸作为自由基中继体, 通过氢提取路径实现了醇的脱氢反应。本工作所发展的选择性脱氢反应为合成化学中醇的选择性转化提供了一条新途径。相关研究结果发表在国际化学类顶级期刊 Angew.Chem. Int. Ed. 2017, 56, 3020 – 3024 上, 并被选为 Hot Paper 向读者推荐。

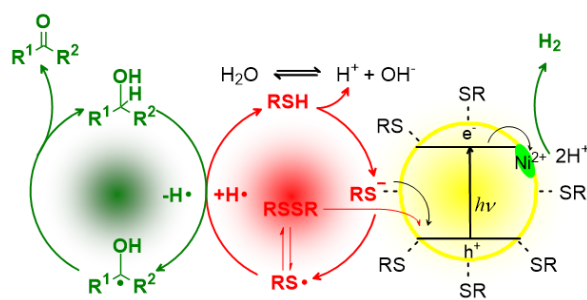


图3 量子点光催化醇的选择性脱氢反应

(2) 应《有机化学》期刊主编陈庆云院士邀请, 撰写综述: 萘衍生物的光化学二聚反应近期合成进展与应用 (Chin. J. Org. Chem. 2017, 37, 543), 并被选为该期刊 2017 年第三期封面; 应德国 Synlett 期刊主编、美国加州大学伯克利分校 Peter Vollhardt 教授邀请, 撰写研究亮点文章: Recent Synthetic Advances on π -Extended Carbon Nanohoops (Synlett2017, DOI: 10.1055/s-0036-1588978);

3. 光物理研究取得重要进展

基于我们在人工模拟光捕获领域的系统研究工作和进展, 应 ACS Energy Letters 主编邀请撰写分子/超分子光捕获体系的展望综述 (Perspective), 对近年来新兴的光捕获体系和技术进行综述和展望 (ACS Energy Letters2017, 2, 357–363), 并被编辑推荐为封面文章。

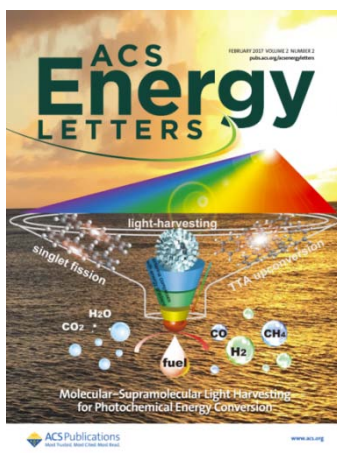


图4 光捕获体系和技术综述

4. 人才培养取得重要进展

丛欢研究员获德国 Thieme 出版社颁发的 2017 年度 Thieme Chemistry Journals Award。该奖项针对有机合成领域，在全球范围内遴选独立工作起步阶段表现出发展潜力的年轻学者，每年授予数十人。



图 5 获奖证书

(二) 下一步工作计划

将在前期工作基础上，继续进行高效、稳定和廉价的太阳能光催化制氢和二氧化碳还原体系的研究，利用光化学反应新技术以及可见光催化继续开发惰性键活化新反应研究。

培育二 环境友好材料与绿色生产工艺

概述：本方向本季度在研项目 2 项；围绕酶法明胶关键技术和降解树脂工艺的讨论会共计召开 6 次；招聘技术工人 1 人。

（一）本方向本季度重要进展

1. 宁夏快速明胶生产工艺项目：以骨粉为原料，采用酶解工艺快速制备食用、药用明胶生产工艺，实施地点在宁夏回族自治区吴忠市，总投资约 1 亿元，预计产能 3000 吨/年。2016 年 10 月实现 3000 吨/年酶法明胶生产线投产，本季度重点开展了生产工艺优化以及酶法胶囊研究工作。

2. 东宝生物骨素酶法生产工艺项目：以骨素为原料，采用酶解工艺快速制备食用、药用明胶生产工艺，实施地点在内蒙古自治区包头市，2016 年完成 3000 吨/年生产线建设，总投资超过 2 亿元。本季度重点开展了试生产相关工作，目前处于生产调试阶段。

3. 山东悦泰 15 万吨 PBS/PBAT 生产线建设现已完成土地划拨和地上建筑设计工作，基建工作正式展开。此外，针对可降解塑料产业布局中国西北地区及一带一路沿线的规划设计和落地方案进行了讨论，与相关地方进行多次交流和沟通，落地可选新疆乌鲁木齐市、新疆奎屯市及霍尔果斯。

（二）下一步工作计划

2017 年年底计划完成酶法胶前处理的装备选型与调试，并经过整体工艺调试完成 3000 吨酶法明胶的生产投产，同时针对不同特征原料，开展酶法工艺适配性研究，建立原料标准。

培育三 激光显示及产业化

概述：本方向本季度围绕高性能激光家庭影院和大型公共激光显示（含激光电影放映机）等激光显示产品化开发，在研项目 3 项，召开激光显示及产业化协调会议 3 次。

（一）本方向本季度重要进展

1. 两项国家重点研发计划激光显示、一项中科院重点部署激光显示项目组织实施顺利，累计到位专项经费 2450 万元。

（1）理化所承担和参与了两项 2016 年度国家重点研发计划激光显示项目，为确保项目的有序实施，规范项目的管理和执行，依据《国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项实施方案》、《国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项 2016 年度项目申报指南》、《国家重点研发计划管理办法》（征求意见稿）和《国家重点研发计划资金管理办法》，结合理化所相关管理规定，制定了项目的总体研发技术方案，明确了项目技术过程控制流程，完善了项目实施管理办法；同时，针对本项目中关键考核指标的测试规范、测试方法、测试环境、测试设备等环节制定了测试大纲，为高质量的完成预期目标打下了良好基础。

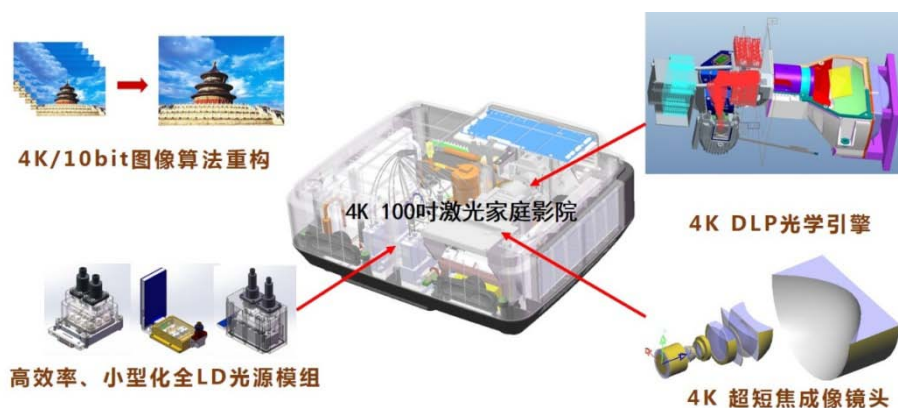


图 6 项目总体/关键技术设计与优化

基于制定的项目技术过程控制图，严格按照项目进度安排，目前项目进展顺利，面向激光显示及产业化共性关键技术，重点开展了高效率/小型化一体化激光光源设计与装调、基于 DLP 光学引擎的 4K/10bit 图像算法、4K 超短焦成像镜头、微结构屏幕、消除散斑、成像光学等技术的研发和产业化攻关。目前已初步建立激光显示光源装调平台、散斑检测平台，为项目顺利实施奠定基础。

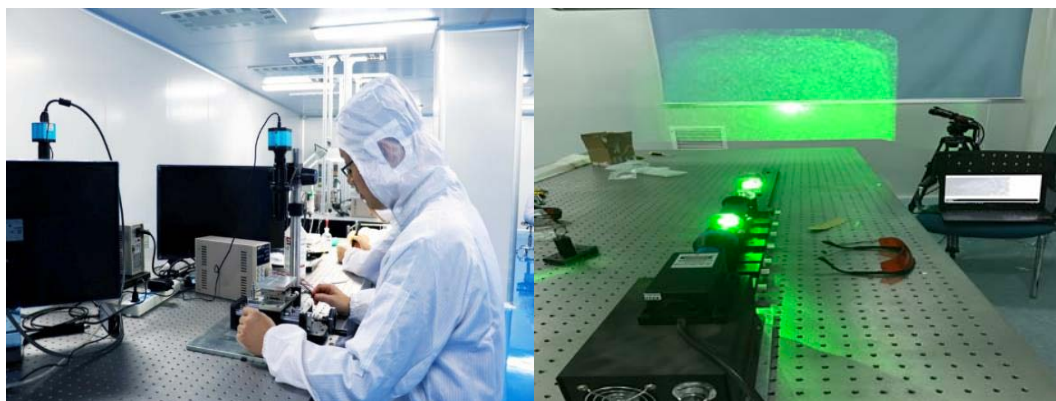


图 7 三基色 LD 光源装调平台消散斑实验平台

(2) 理化所承担了中科院重点部署计划激光显示项目，围绕三基色激光显示技术中的重大科学问题，开展高效能光源模组驱动及热管理技术、全色光源实时白平衡的闭环控制及色温调控技术、激光全息算法图像处理技术、全息图像引擎、综合性能表征测试等重大核心

关键技术研究，开发基于 LCOS 光学引擎的 4K 激光家庭影院。目前样机已研制成功，进入到整机装调阶段。

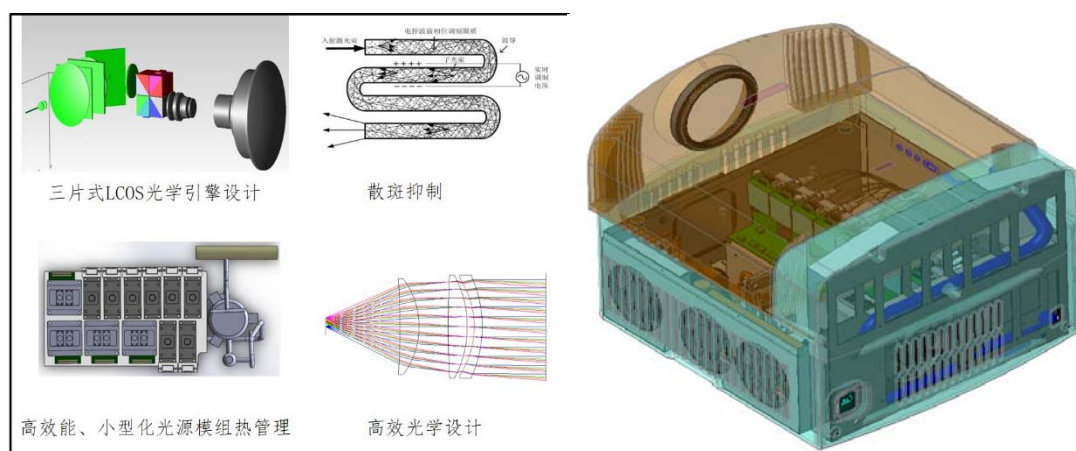


图 8 4K 激光显示关键技术 4K LCOS 激光显示整机示意图

2. 联合国内激光显示优秀高校/院所、企业，组织申报两项 2017 年国家重点研发计划激光显示项目：

依据国家重点研发计划“基础研究→共性关键技术→产业应用示范”的完整创新链设计要求，理化所组织力量申报激光显示三基色 LD 光源共性关键技术项目，目前项目已通过专家评审/立项。

3. 激光显示产业化进展

为了推进激光显示产业化快速发展，理化所联合杭州市地方政府、天使基金成立杭州中科极光科技有限公司，开展激光显示技术成果转化研究工作。目前已经突破了小型化高性能三基色 LD 激光模组、高效率控制驱动、高精度分时调制、颜色管理、高效能热管理、匀场照明与散斑消除等关键技术，开发出了超高清激光家庭影院、高性能激光数字影院、特种显示器和三基色激光光源四大类新一代激光显示系列产品，其中 100 英寸级高清激光家庭影院成本已小于 7 万元，主要技术指标已达国际领先水平，并围绕自主开发的关键技术申请了几

十项专利，在国内产业了重大影响，成为了杭州市制造业转型、高端产业发展代表企业之一。2017 年 3 月 29 日，杭州市委副书记、代市长徐立毅一行考察中科极光，参观了公司总体装配及光源生产车间，体验了中科极光自主研发的 100 英寸高亮度纯激光家庭影院、超高亮度激光数字影院、分体式特种激光显示器等新一代激光显示产品。

（二）下一步工作计划

基于已经取得的阶段性成果，将继续攻克激光显示产业化关键技术，开发并丰富激光显示产品的种类，推动激光显示更广泛的应用，为激光显示产业化奠定基础：

（1）完善和优化超高清激光家庭影院的整机一体化设计，攻克小型化高性能三基色 LD 激光模组、高效率控制驱动、高精度分时调制、颜色管理、高效能热管理、匀场照明与散斑消除等产业化关键技术，力争开发出低成本/高性能激光家庭影院产品。

（2）2018 年重点研发计划激光显示方向指南已经发布，为了顺利争取项目的立项，团队将继续开展更多类型/系列化激光显示样机/产品开发，包括 4K DLP 激光电视、数字影院等，为申请 2018 年度国家重点研发计划提供强有力的保障。

（3）由理化所牵头的激光显示项目已经入围“国家重点新材料研发及应用”重大工程，通过了国家咨评委评审和六部委审查，预计 2018 年启动。为了顺利争取国家重大工程，理化所应用激光中心拟于 2017 年第三季度联合杭州中科极光科技有限公司，成立“三基色 LD 激光显示联合实验室”，建立具有国际先进水平的激光显示创新研

发平台,开展三基色 LD 激光光源模组研发、激光微纳光学器件研发、光学仿真与评测、大色域高清激光显示图像处理与检测等整机技术及光源等关键技术攻关,为国家重大工程的申请提供强有力的支撑。

培育四 分散能源气体液化分离技术与应用

概述: 本方向本季度在研项目 3 项, 召开协调会议 7 次。

(一) 本方向本季度重要进展

1. 偏远天然气气井方面: 结合内蒙古鄂尔多斯 3 万方/天煤层气液化装置现场运行近 3 年的现场经验, 我们进行了冷箱换热器和净化系统进行了深入优化和调整, 完成了干气天然气类型撬装式液化装置的整套制造、调试和运行等工艺文件的标准化定型。

2. 液化装置应用方面: 新部署内蒙古杭锦旗地区、山西地区和陕西榆林地区气液化现场装置, 共完成三套日处理量 3 万方液化装置的设计和制造及现场工程。

(二) 下一步工作计划

对内蒙古鄂尔多斯 3 万方/天天然气液化装置现场调研发现, 现场有大量发电余热直接排放, 且有预冷用冷水需求, 拟开发余热驱动型的制冷系统, 最大限度的降低能耗, 节能减排。下一步工作拟进行余热驱动型的制冷系统设计, 并做好产品开发前的准备工作。

培育五 液态金属材料前沿技术

本方向本季度在研项目 8 项，召开协调会议 3 次。

（一）本方向本季度重要进展

1. 发现液态金属胞吞效应：金属间润湿触发的颗粒内化

研究发现，液态金属液滴可在溶液环境中借助电场或化学物质的激励作用将周围颗粒吞入体内，如同细胞生物学界的胞吞效应，效率极高，这一成果也因此开辟了一条构筑高性能纳米金属流体材料的快捷途径，相关成果引发重大反响。与外来物跨越细胞膜类似的是，颗粒进入液态金属内部的先决条件是必须克服同时存在于固/液两种金属相界面上的氧化膜的阻碍。本研究提出了三类激励机制以实现液态金属的胞吞作用，即：电阴极极化、辅助金属物极化和化学物质触发，分别揭示出在酸性、碱性和中性溶液环境中实现液态金属胞吞作用的规律。其中，通过外加电场产生阴极极化的方法具有快捷可控、易于操作等优点，因此也更具普适性。进一步研究还发现，支配液态金属胞吞现象的机制在于固/液两金属相之间的润湿作用，为此研究人员建立了旨在定量刻画固/液两金属相之间接触关系普遍规律的理论模型，较好地解释了实验结果，并估算出不同材料颗粒胞吞作用的能垒，进一步预测了有关颗粒材料的吞噬作用能否自发进行。此外，研究揭示，金属间的反应性润湿是胞吞作用得以推进的另一关键因素。相关研究成果发表于《Advanced Science》杂志（Advanced Science, DOI: 10.1002/ advs. 201700024, 2017）。

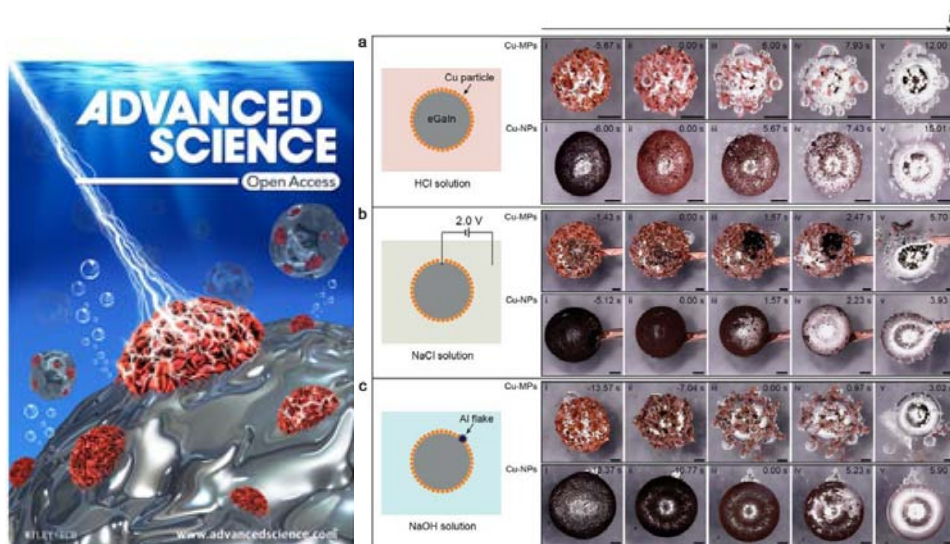


图9 期刊封面故事反映的液态金属吞噬颗粒效应（左）

及三类技术实现途径（右）

液态金属吞噬效应的发现，展示出了十分丰富的科学内涵，其同时对于规模化制备超级液态物质如极高导热率界面材料、高导电性电子墨水以及强磁性液态金属等尤具实际价值。一方面，该发现使得不同金属颗粒得以高效分散加载到液态金属相中去，因此可以按照设计需求来人为增强或改善液态金属的某些物理化学特性；另一方面，该效应也使得液态金属可通过结合特定微/纳米颗粒来获得全新属性。

2. 发现伽伐尼腐蚀电偶诱发的液态金属 Marangoni 流动

研究发现并揭示了液态金属由于与另一类金属接触所诱发的表面流动的深层机理。通过测量液态金属的电势降落，引入电化学腐蚀理论，量化了 Ga-Cu 腐蚀电偶所诱发的液态金属 Marangoni 流动和界面剪切力的大小；并运用流体力学数值模拟验证了相应结果。研究还进一步发现温度场会显著改变整个流场的分布。这一发现拓展了人们对液态金属界面流动的理论认识。相关研究成果发表于《Soft Matter》

杂志 (Soft Matter, 13: 2309-2314, 2017)。

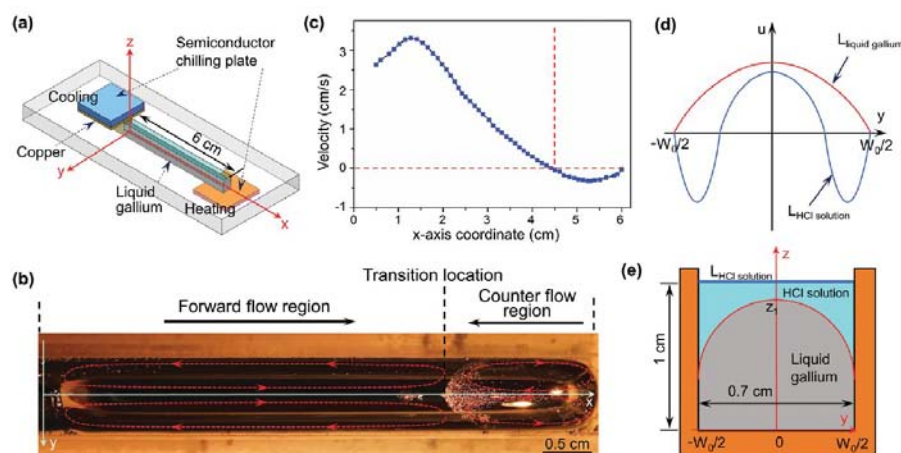


图 10 伽伐尼腐蚀电偶及温度梯度诱发的液态金属 Marangoni 流动

3. 揭示液态金属变形虫表面效应

液态金属液滴因自身表面张力较大, 在电解液中通常以球形方式存在, 塑形能力及变形模式相对有限。而在处于电解液环境中石墨表面, 液态金属则具有以任意形状稳定呈现的自由塑型效应, 并能实现逆重力方式的攀爬运动 (Advanced Materials, 28: 9015, 2016)。为深入揭示这一现象, 研究人员选择了玻璃、石墨、镍、氧化铜等材料作为基底, 对比考察液态金属自由塑形效果。结果表明, 氧化铜与石墨非常接近, 在电解液中可诱发液态金属自由塑形; 基底表面正电荷密度、粗糙度、浸润性对液态金属自由塑形具有关键影响, 基底表面具有高正电荷密度、高粗糙度、无气泡产生非常有助于液态金属自由塑形。相关研究成果发表于《Science Bulletin》杂志 (Science Bulletin, doi.org/10.1016/j.scib.2017.04.015)。

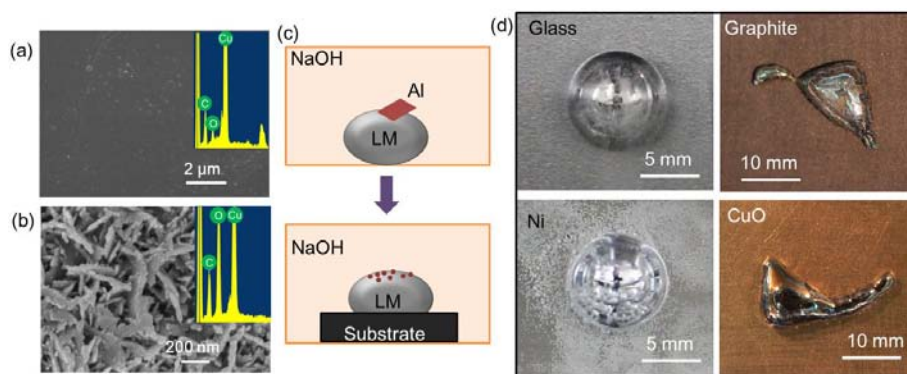


图 11 液态金属在玻璃、镍、石墨与氧化铜表面自由塑形现象对比

以上液态金属系列类生物学效应的基础发现彰显这类材料蕴藏着的新奇物理化学行为,对于理解人工材料与自然界生命现象之间的关联乃至进一步发展先进技术具有启发意义。

4. 低熔点金属相变散热技术研究

镓或镓基合金是一类非常适于高密度瞬态热流发热器件散热的低熔点金属相变材料。在 25℃ 室温环境下,这类高热导率低熔点金属可在 1s 内快速吸收高达 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 瞬态发热流并通过热扩展器散发到外部环境种,使得发热器件最高温升不超过 20℃ (Applied Thermal Engineering, 119: 34-41, 2017)。这种低熔点金属相变散热技术的提出,为大功率 LED (500W 及以上级别) 或固体激光 (10KW 级) 等散热提供了新途径。

(二) 下一步工作计划

1. 高热导率液态金属复合功能材料研制及测量平台搭建。
2. 大功率液态金属 LED 散热器样机研制及性能测试。
3. 液态金属可控变形技术研究: 揭示液态金属变形特性的空间构象转换机制、液态金属与弹性载体相互作用及其力传递规律、外场

诱导和自驱动型的液态金属变形及运动机理；构建阵列式自驱动型液态金属微泵驱动技术。