

国家同步辐射实验室（NSRL）

综述及基本情况

设施概述

国家同步辐射实验室坐落在安徽合肥中国科技大学西校园，是我国批准建设的第一个国家实验室。实验室建有我国第一台以真空紫外和软 X 射线为主的专用同步辐射光源（简称“合肥光源”、“NSRL”）。

合肥光源的建设历经 HLS-I 和 HLS-II 两个阶段。

HLS-I 包括一期工程（1983 年立项，1991 年通过国家验收，总投资 8040 万元）和二期工程建设项目（1999 年开工建设，2004 年通过国家验收，总投资 11800 万元）。在此期间，合肥光源坚持稳定运行、优质开放的原则，为我国材料科学、凝聚态物理学、化学、能源环境科学等领域提供了一个优良的实验平台，取得了一系列研究成果。

HLS-II 的建设自 2010 年 8 月立项，2012 年 5 月开工，2014 年底完成新建直线加速器、储存环及 5 条光束线站的首批任务。2016 年 1 月投入正式运行，同时边运行、边建设，逐步完善通用辅助设施的基础设施改造，实施恒流运行等改造，不断提升光束线站性能。目前 HLS-II 已建设完成，达到三代光源运行水平。

合肥光源目前拥有 10 条光束线及实验站，包括 5 条插入元件线站，分别为燃烧、软 X 射线成像、催化与表面科学、角分辨光电子能谱和原子与分子物理光束线和实验站；以及 5 条弯铁线站，分别为红外谱学和显微成像、质谱、计量、光电子能谱、软 X 射线磁性圆二色光束线和实验站。此外还有 3 个出光口为未来发展预留空间。

作为国家大科学装置和合肥大科学中心的重要组成部分，NSRL 将继续面向国家战略需求和前沿基础科学研究，为各领域科学家提供长期、可靠、稳定的技术支撑。

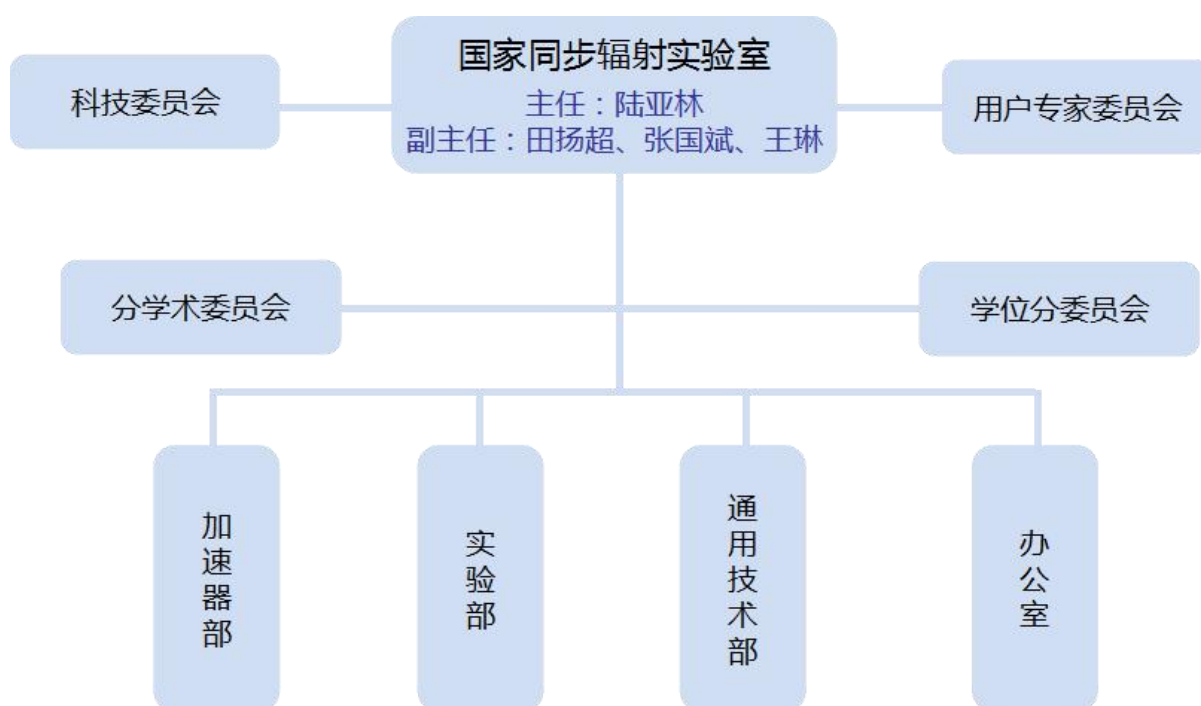
主要研究目标

NSRL 致力于提升机器性能，发展新的实验技术和方法，积极引进和培养国内外高水平用户，围绕前沿科学领域和国家重大需求，为国内外众多学科领域提供独特的大型综合交叉研究平台。

在科学实验方面，NSRL 围绕合肥大科学中心的能源与环境、量子功能材料、物质与生命科学交叉等领域科学目标，重点发展能量转换材料、化石燃料的清洁燃烧、大气环境、关联电子材料、多尺度生物成像等前沿学科领域的前沿课题研究。同时，还围绕电子加速器前沿科学和用户需求，开展先进光源物理和关键技术研究。

在保证稳定运行、优质开放的基础上，NSRL 最终目标是建成具有世界一流水平的红外-真空紫外-软 X 射线波段的光源，成为合肥大科学中心的重要组成部分、国家交叉科学研究中心和人才培养基地，为用户提供世界先进的实验平台，推动我国同步辐射应用研究取得创新成果。

组织结构框图



研究进展与成果

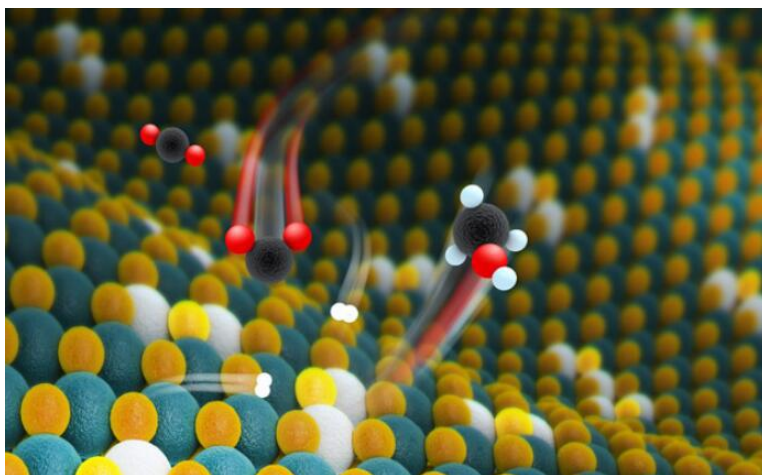
NSRL 瞄准国际前沿和国家需求，凝练科学目标和研究领域，联合高水平用户，在材料、能源、环境等基础研究和应用研究方面取得了一系列重要成果。

2018 年 NSRL 发表论文 403 篇，其中 1 区 169 篇，影响因子大于 9.0 论文 107 篇。发表在 CELL, Nature Catalysis, Physical Review Letters, PNAS, Advanced Materials, Nature Nanotechnology, Journal of the American Chemical Society, Angew. Chem. Int. Ed. 等国际著名期刊上。获得省部级以上奖励 4 项，获得发明专利授权 16 项，实用新型授权 14 项。

SCI 收录 论文数	论文 引用数	国外发表 论文数	用户相关 论文数	获省部级 以上奖数	发明专利 授权	实用新型 专利授权	软件 著作权
364	-	385	295	4	16	14	-

● 二氧化碳催化加氢制甲醇

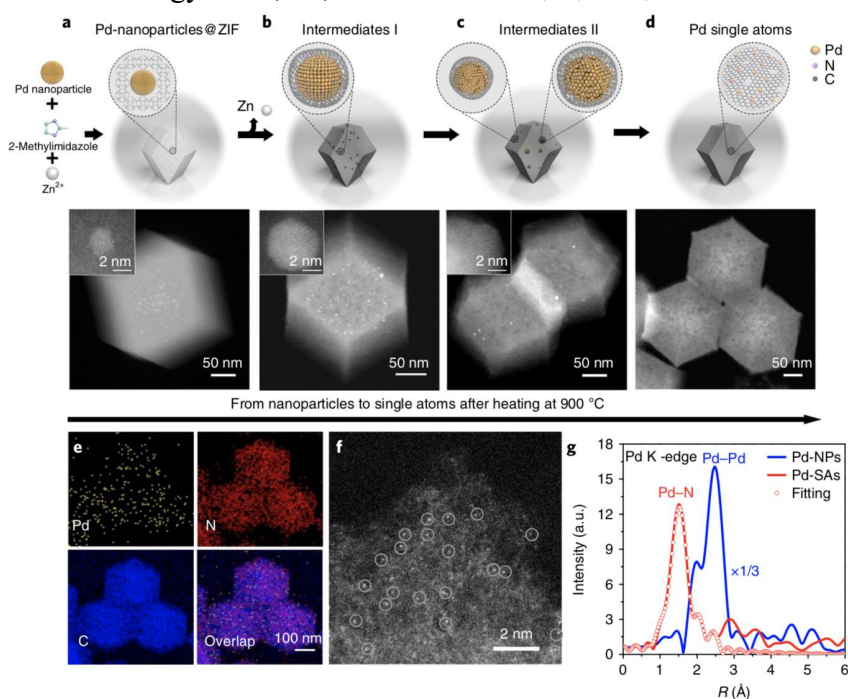
二氧化碳是当今最主要的温室气体，也是一种“碳源”。将二氧化碳转化为液体燃料，不仅能有效缓解温室效应，更将引领新一代能源革命。中国科学技术大学曾杰教授团队通过构筑铂-硫化钼原子级分散催化剂，能够将二氧化碳这一温室气体高效转化为清洁液体燃料——甲醇。通过与合肥光源光电子能谱实验站合作，揭示出单中心近邻原子协同催化作用机制，且该协同作用是通过近邻铂原子之间的配位硫原子体现出来的。在孤立铂单原子上，二氧化碳不经历甲酸中间体而直接转化为甲醇；相反，近邻铂单原子会协同催化二氧化碳加氢反应改变反应路径，使二氧化碳先转化为甲酸再进一步加氢生成甲醇。相关成果发表在《自然·纳米技术》（Nature Nanotechnol 2018, 13, 411-417）上，并被《人民日报》头版报道。



基于原子级分散钯-硫化钼催化剂的二氧化碳加氢制甲醇示意图

● 直接观察贵金属纳米晶向热稳定金属单原子位点的转变

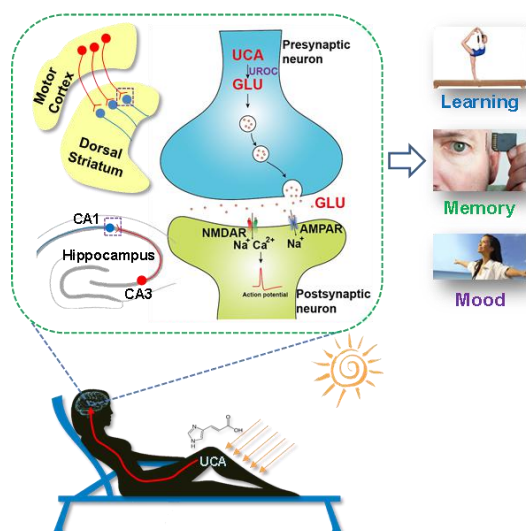
超细贵金属催化剂例如金属单原子或团簇催化剂，在高温下容易团聚，导致催化剂活性降低甚至失活，所以提高金属催化剂的热稳定性十分重要。清华大学李亚栋院士课题组利用金属有机框架包裹超细贵金属纳米颗粒，高温煅烧后，成功实现了贵金属纳米颗粒到单原子的转变。并直接拍摄到金属纳米颗粒单原子化过程的视频，及揭示了单原子化过程的转变机理。利用合肥光源光电谱对催化剂的氧化态和电子结构进行了细致的表征，证实了所合成单原子催化剂具有优异稳定性。金属纳米颗粒的单原子化过程有望解决工业贵金属催化剂高温下团聚失活这一难题。相关成果发表在《自然·纳米技术》（Nature Nanotechnology 2018, 13, 856-861），研究内容被选为期刊封面。



贵金属纳米颗粒向金属单原子位点的转变

● 日光照射改善学习记忆的脑内谷氨酸合成新通路

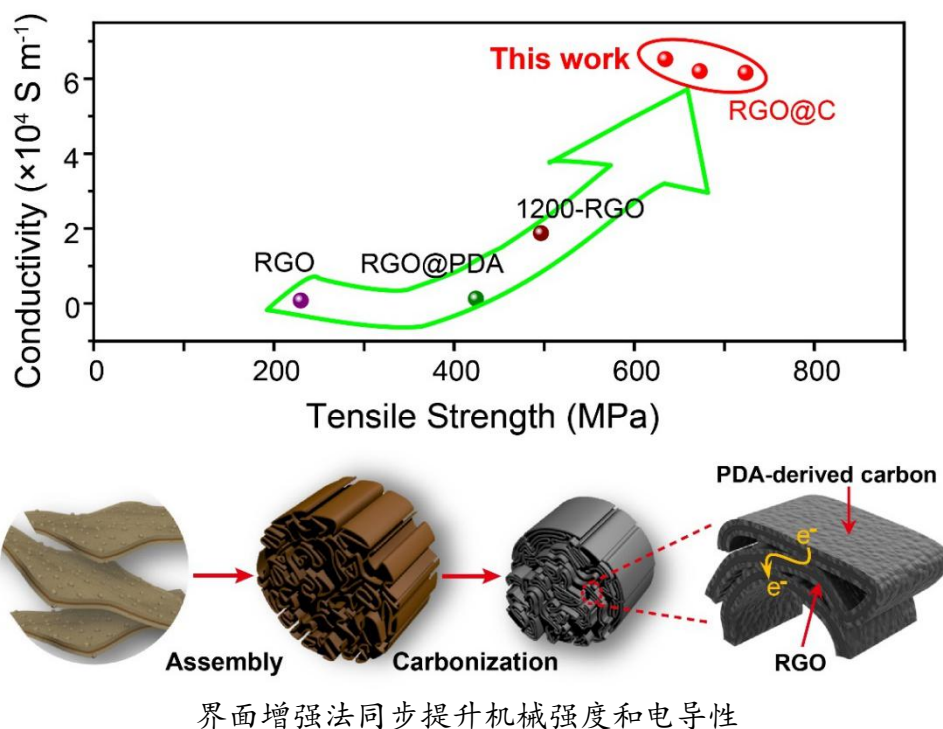
适度的日光照射可以改善人们的情绪和认知。然而，日光照射引起与神经系统相关的行为变化的深层机制仍不清楚。中国科学技术大学生命科学学院熊伟教授与化学学院黄光明教授与合肥光源质谱站合作，通过单细胞质谱、光遗传、分子生物学、电生理及动物行为学等技术方法，揭示了一条脑内谷氨酸合成新通路及其参与日光照射改善学习记忆的分子及神经环路机制。相关研究成果发表在国际著名期刊 CELL（2018, 173, 1716-1727）。



日光照射改善人类情绪、学习和记忆的分子及神经环路机制

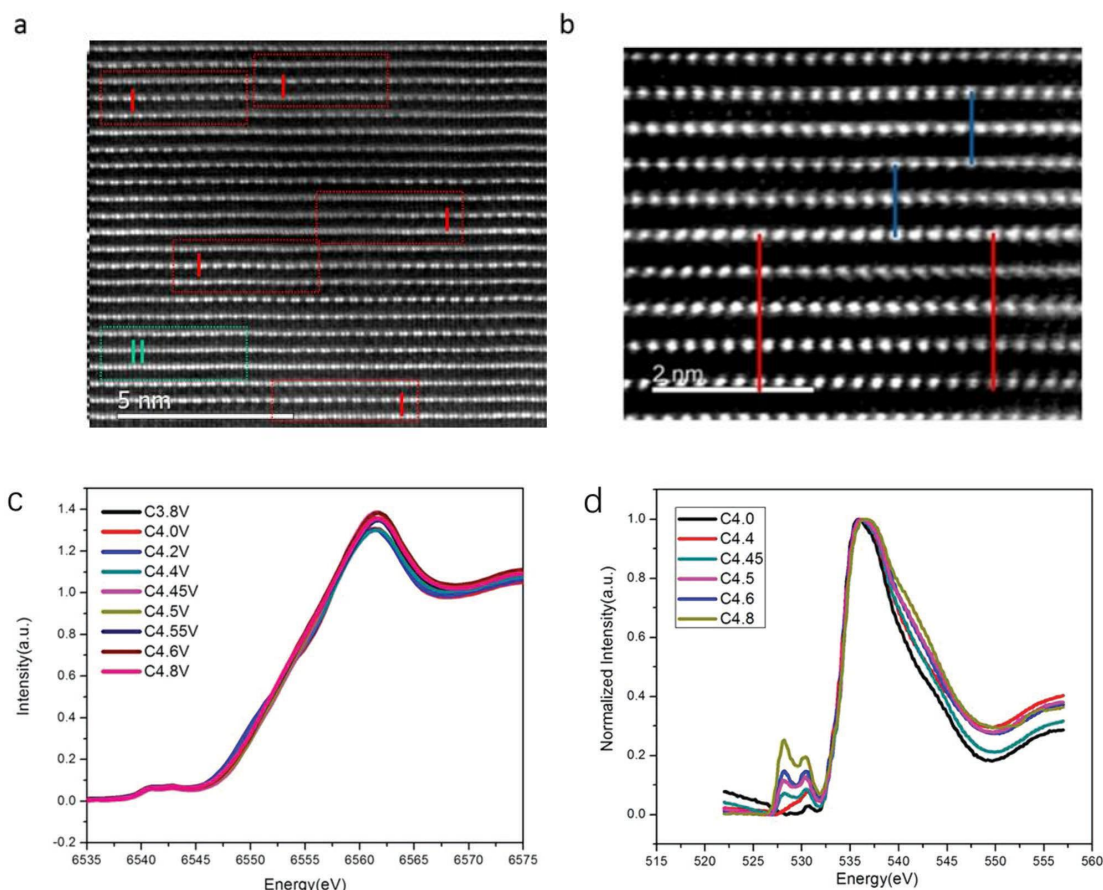
● 高强、高导电性仿贝壳纤维

机械强度和电导率是石墨烯基纤维能否在柔性微电子器件领域应用的至关重要的两个参数，而如何有效地同步提高两者的性能仍是目前面临的一个重大的挑战。受天然珍珠母多级尺度结构启发，中国科学技术大学俞书宏教授和合肥工业大学从怀萍教授组成的研究团队合作，原位引入聚多巴胺衍生碳作为阻力增强剂、粘结剂与导电“桥梁”，获得了兼具高强度、高导电性的石墨烯基仿贝壳纤维。利用合肥光源 CT 成像站，对其结构进行了成像表征，确认了其类珍珠母的多级次结构特征，并以此为基础分析了两个参数同步提升的内在机制。相关成果发表在《先进材料》(Adv. Mater. 2018, 30, 1706435) 上。



● O₂-锰基富锂材料的制备和表征

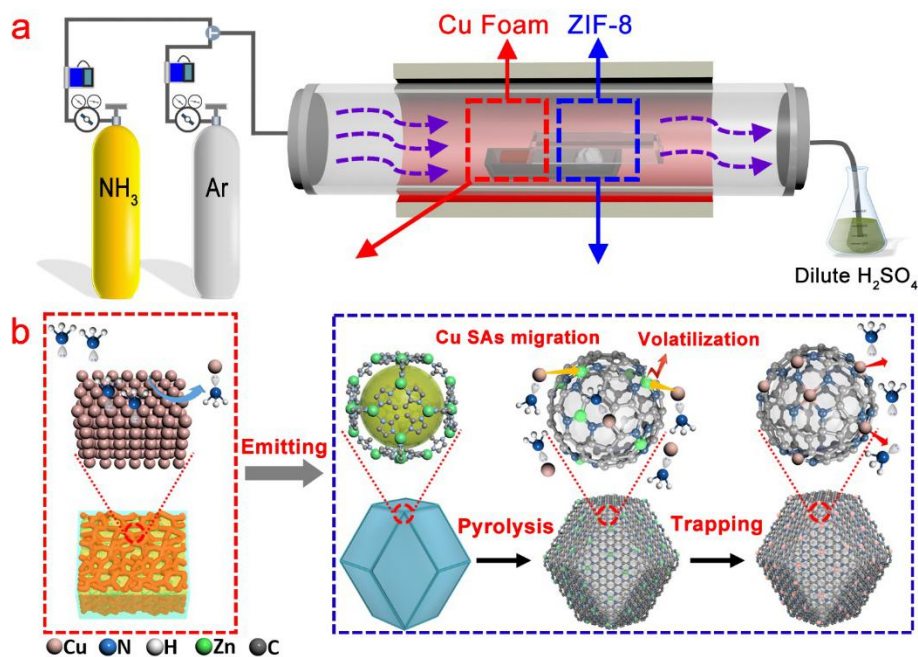
面对日益增长的能源需求，锂离子电池因绿色、环保、能量密度高作为储能设备得到广泛关注。传统的 O₃ 富锂材料体系存在的特殊的 Li-O-Li 构型能激发阴离子氧化还原中心提供额外的容量，然而这也带来了如电压衰退、首次效率低等问题。北京大学夏定国教授团队从调节几何结构的角度，设计并合成了一种全新的 O₂ 富锂材料，这种材料从根本上解决了富锂材料的电压衰退问题同时具有非常高的首次库伦效率。利用合肥光源软 X 射线表征并证明了该体系阴离子电荷补偿的高度可逆性，同时这种材料也是目前最高比能量密度的锂离子电池。相关成果发表在 Advanced Materials(2018, 30, 1707255)。



a) $\text{Li}_{1.25}\text{Co}_{0.25}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ 样品的高角环形暗场 (HAADF) 图像; b) 基于 $P6_3mc$ 空间群, 沿 100 方向放大 HAADF 图像; c) 不同充电电压下, 归一化的锰 K 边 X 射线吸收谱; d) 不同充电电压下, 氧 K 边软 X 射线吸收谱。

● 体相铜金属一步转变制铜单原子催化剂

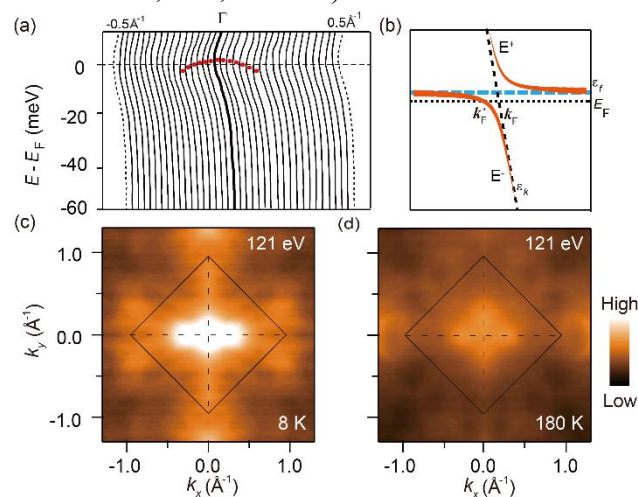
单原子催化剂由于其最大原子利用率和统一的分子轨道等特点, 使得它对多种催化反应都表现出很高的活性和选择性。然而传统的自下而上的合成策略容易造成单原子团聚, 限制了该类催化剂的大量制备。发展简单的合成方法大规模制备高活性单原子催化剂仍为巨大挑战。中国科学技术大学吴宇恩教授和清华大学李亚栋院士合作, 开发了一种“自上而下”的气相迁移策略, 将廉价的块体金属铜一步转换为高活性的铜单原子催化剂, 并在实验室中实现了铜单原子催化剂的克级制备。利用合肥光源 EXAFS 对催化剂的配位结构进行了详细研究, 确认了催化剂中的 Cu-N_4 结构。相关成果发表于 *Nature Catalysis* (2018, 1, 781-786) 杂志上。



铜块体金属制备铜单原子催化剂

● CeRhIn₅ 中能带依赖性的带间杂化

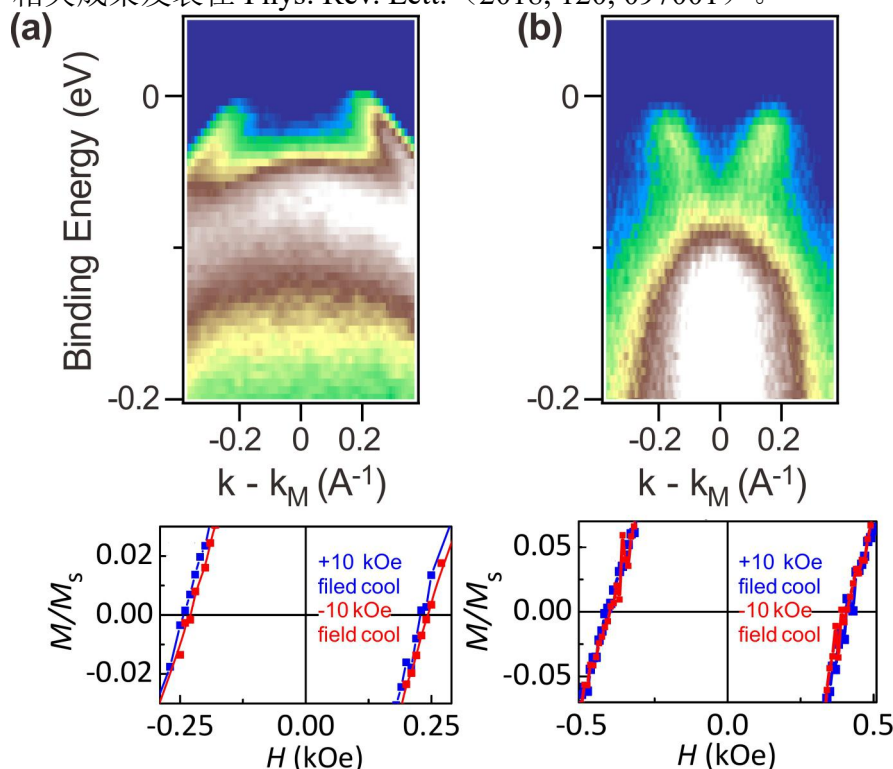
重费米子CeMIn₅ (M=Co, Rh, Ir) 体系是重费米子化合物中非常重要的一个家族，其中CeCoIn₅和CeIrIn₅是超导体，而CeRhIn₅是反铁磁体。Rh在元素周期表中位于Co和Ir之间，但CeRhIn₅却表现出与另二者完全不同的基态性质。为探索CeRhIn₅与其姐妹化合物基态性质差异的起源，复旦大学封东来教授研究组通过角分辨光电子能谱对其电子结构进行了系统研究，在低温观察到f电子与导带电子发生了明显的带间杂化，且该杂化存在明显的能带依赖性。该研究组还通过偏振光电子能谱辨别出CeRhIn₅中不同的晶体场劈裂能级。(Phys.Rev.Lett. 2018, 120, 066403)



(a) 扣除费米-狄拉克函数后的能量色散曲线， (b) f能带与导带杂化示意图，
(c, d) 高低温下 CeRhIn₅ 的费米面，8 K (c) ， 180 K (d)

● 钛酸锶表面外延 FeSe 薄膜的反铁磁有序态

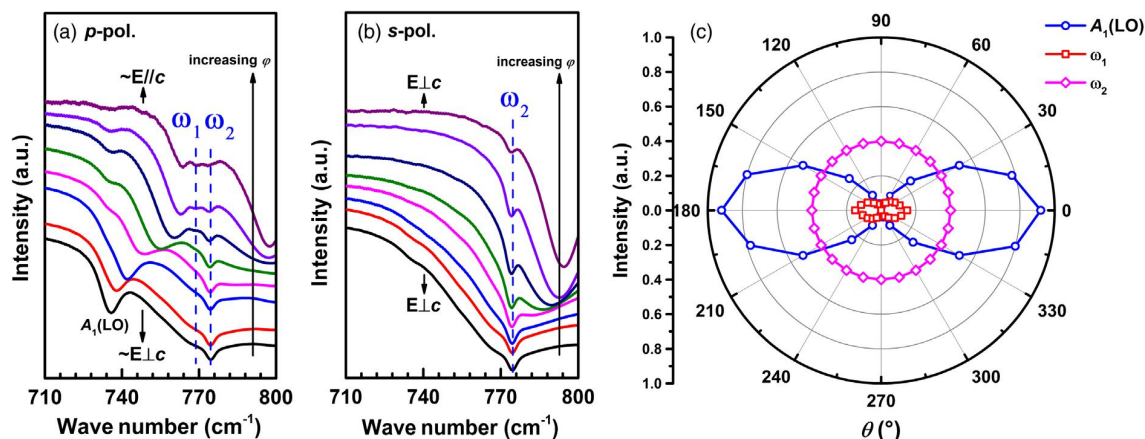
钛酸锶表面外延的单层 FeSe 薄膜呈现出最高 109K 的超导行为，其物理起源尚不清楚。理论计算建议在薄膜中反铁磁作用会被极大增强，有助于在很高的电子掺杂下产生很大的自旋涨落。如何检验其中是否存在反铁磁序是很大的实验挑战。上海交通大学钱冬教授和南京大学吴镒教授针对此问题开展了合作研究，通过磁交换偏置测量结合角分辨光电子能谱，发现在单层 FeSe 母体薄膜中存在反铁磁长程序，其相变温度高于 140K，通过电子掺杂后反铁磁序消失，出现超导。此发现为理解 FeSe 薄膜的奇特物性提供了重要信息。相关成果发表在 Phys. Rev. Lett. (2018, 120, 097001)。



(a) 没有电子掺杂的单层 FeSe 薄膜的 ARPES 能谱及有偏置的磁滞回线；(b) 重电子掺杂后单层 FeSe 薄膜的 ARPES 能谱及没有偏置现象的磁滞回线

● 氮化物半导体掺杂机制

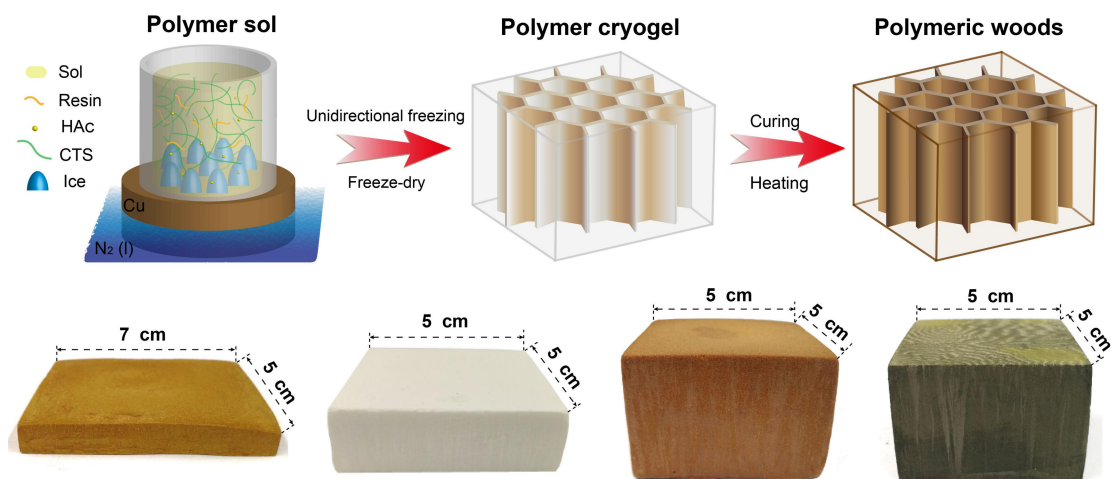
氮化物宽禁带半导体是用于半导体照明、新一代移动通信等的新型材料。掺杂调控是其关键科学和技术问题，但 GaN 中 C 的掺杂机理非常复杂，成为近年来该领域关注的焦点问题之一，确定 C 杂质在 GaN 中的晶格位置至关重要。北京大学杨学林和沈波教授课题组利用合肥光源红外谱学实验站变角和偏振红外反射谱技术，给出了 C 杂质在 GaN 中替代 N 位的直接证据，解决了这一长期存在的争议问题。该成果对于理解和认识 C 杂质在 AlN、BN、ZnO 等其他六方对称化合物半导体材料中的掺杂行为亦具有重要的参考价值。相关成果发表在 Phys. Rev. Lett. (2018, 121, 145505) 杂志上。



(a)-(b)不同偏振下的红外变入射角反射谱; (c) ω_1 , ω_2 和 $A_1(LO)$ 三种振动模式强度与偏振角度关系

● 仿生人工木材的创制

天然木材具有轻质高强的特点，如何制备具有该特点的材料是仿生材料研究领域面临的挑战。中国科学技术大学俞书宏教授团队发展了一种冰晶诱导自组装和热固化相结合的新技术，以传统的酚醛树脂或密胺树脂为基体材料，成功研制了一系列具有类似天然木材取向孔道结构的新型仿生人工木材。利用合肥光源 CT 成像对其微观结构进行表征，证实了其结构与天然木材的高度相似性。该系列仿生人工木材具有轻质高强、耐腐蚀和隔热防火等优点。研究成果发表于 *Science Advances* (2018, 4, eaat7223) 上，并被 *Science* 科学新闻杂志 (*Science News*) 报道称“这种人工木材强如实木，且不会着火” (2018, doi:10.1126/science.aav0689)，及被 *Scientific American* 以“Artificial Wood”为题选为亮点 (2018, 319, 12)。



仿生人工木材的制备过程与多种人工木材的图片

设施建设、运行与改造

2018 年合肥光源运行数据

设施名称	设施运行总机时	调束注入机时	提供束流机时	机器研究机时	用户实验机时	停机检修机时	故障机时	其他
合肥同步辐射装置	7243.25	78.25	5463.64	1118.00	46109.23	529.25	54.11	0

2018 年合肥光源用户开放情况

设施名称	实验束线数	实验站(终端)数	用户单位数	用户计划实验课题数	用户完成实验课题数	用户实验参加人数	用户实验涉及领域及比例	故障机时
合肥同步辐射装置	10	10	117	195	370	1320	物理学 16.76% 化学 40% 生物 3.51% 地质 0.54% 材料科学与工程 17.57% 其他 21.62%	-

设施	用户总数	院内	院外		其中					
			国内	国外	大学	研究所	政府机构	企业	军工	其他
合肥同步辐射装置	117	32	79	6	78	34	0	3	0	2

2018 年度主要目标是保障合肥光源高效率、稳定的运行；进一步完善提高实验线站性能、提高运行可靠性及用户满意度；围绕重点研究方向，服务用户开展科学研究，取得若干重要成果。

➤ 光源运行情况、机器研究与性能提升

2018 年合肥光源计划运行 7005 小时，其中供光 5271 小时。实际运行 7219.3 小时，其中供光 5485.49 小时，均超过计划时间，圆满完成运行任务。2018 年光源运行状况良好，开机率达到 99.06%，平均无故障时间 96.24 小时，平均故障恢复时间 0.91 小时，处于国际同类装置先进水平。

为保障机器的稳定运行，NSRL 开展了一系列常规机器研究，如定期测量光源的参数（工作点、Beta 函数、色散函数等）并进行相应校正。通过基于束流准直的方法，定期校正束流的理想轨道，保证了束流轨道长期运行的重复性，保证了供光质量。

本年度合肥光源完成了恒流运行关键系统改造，并顺利通过项目验收。2018 年下半年，合肥光源的运行由衰减模式正式转换成恒流模式。目前运行状态稳定，线站工作正常，

合肥光源的性能得到了进一步的提升。

X 射线吸收光束线已生产完毕运抵实验室，并完成环外预安装，将于 2019 年接入储存环。

中国科学院合肥大科学中心重点研发项目“合肥光源超导扭摆磁铁系统”正在顺利开展，目标是实现液氦零蒸发运行。目前所有零部件均已加工完毕，待低温制冷机到货后即可进行装配调试。

➤ 开放共享

2018 年，实验室积极主动开拓全方位交流渠道，通过合作交流、用户年会、高端用户研讨会、用户培训班等形式，邀请高水平用户积极参与实验室的建设，注重倾听对线站建设、实验技术发展的建议和需求。

2018 年 7 月，召开了 2018 年度用户会议，来自国内外高等院校、科研院所共计 66 家单位的 412 名代表参加了会议。近年来，参会代表单位及参会人数持续提升，2018 年参会人数再创历史新高。

另外，实施特色用户组织计划，主动出击、重点组织，发展新用户，寻找老用户的新合作点，并采取重大产出导向的方式，对重点用户执行政策倾斜，起到了很好的效果。

➤ 维修改造项目执行情况

2018 年 7 月，“合肥光源恒流运行关键系统改造”项目顺利通过工艺验收并于 25 日正式启动运行。项目后续于 2019 年 1 月通过验收。

合肥光源继续执行“合肥光源供电系统改造”项目，2018 年完成两台箱式变电站建设及监控系统扩展，正在准备项目总体验收。

2018 年，“合肥光源角分辨光电子能谱实验站改造”项目进展良好，上半年已完成新型电子能量分析器的安装，大幅提升了数据采集效率，并在小样品的测量中也能够确保数据一致性。“合肥光源软 X 射线束线及实验站维修改造”项目目前进展顺利，已完成了八极矢量电磁场与超高真空测试系统、单色器和后置镜箱的设计加工。

科技队伍与人才培养

设施 人员 总数	按岗位分			按职称分			学生			在站 博士 后	引进 人才
	运行维 护人员	实验研 究人员	其他	高级职 称人数	中级职 称人数	其他	毕业 博士	毕业 硕士	在读 研究生		
178	113	49	16	88	48	42	33	34	261	14	3

围绕 NSRL 的科研发展布局，实验室积极引进高端人才，着力打造高水平的国际化创新人才队伍，培育若干重点领域创新团队，以应对未来科学发展的重大挑战。充分发

挥现有的高端人才的力量，积极联系和引进优秀人才，凝聚队伍，牵头形成创新团队，带动实验室整体队伍建设水平。建立聘期制科研人员引进和管理制度，成立一支高水平的流动科研人员队伍，成为实验室研究力量的有益补充。2018 年成功引进顶尖工程技术专家 2 名，高端人才 3 名。

合作与交流

► 技术合作与交流

由厦门大学牵头，中国科学技术大学国家同步辐射实验室负责红外自由电子激光光源建设的国家重大科研仪器设备研制专项“基于可调红外激光的能源化学研究大型实验装置”。该项目 2018 年全面推进总装及调试工作，目前正在进行第二轮调试。

与苏州大学共建软 X 射线吸收光束线和实验站项目，建成后该线站将为我国纳米科学的结构表征提供先进的支撑平台。

► 国际合作

2018 年，实验室邀请了来自美国、俄罗斯、德国、法国、韩国、日本等多个国家的同步辐射领域专家约 50 人次来我室进行学术交流，多位专家做高水平学术报告。

在加强请进工作的同时，鼓励实验室研究人员积极走出去，拓展眼界、提高知名度，2018 年出访突破 100 人次，并有多人次受邀在国际大会上做邀请报告。

2018 年，国家同步辐射实验室主任陆亚林教授一行先后出访瑞典 MAX IV 光源、法国 SOLEIL 光源、瑞士保罗谢勒研究所（PSI）、意大利 Elettra 实验室、日本 Spring-8 实验室等国际知名的加速器及同步辐射应用研究机构，持续提升实验室国际影响力，并与有关单位达成了合作研究及人才交流计划。

► 学术交流会议

2018 年实验室成功举办的重要学术会议有：

“相干光源和科学国际研讨会（2018）”。该会议为系列会议，每年一届，本次为第三届，由实验室主任陆亚林教授担任主席。会议吸引了 100 余人参会，来自全球著名同步辐射光源如瑞典 MAX IV、法国 Soleil、日本 Spring-8、意大利 Elettra 等世界先进光源的负责人和顶尖技术专家近二十人做了精彩的大会报告。该系列会议对合肥先进光源规划的推进及预研项目的顺利实施提供了有益助力，为提升合肥先进光源的国际影响力起到了积极作用。

“国家同步辐射实验室用户学术年会”。来自国内外高等院校、科研院所共计 66 家单位的 412 名代表参加了会议。会议通过大会报告、专题研讨会、会议海报等多种形式开展了与用户间的交流和讨论，对合肥光源今后的运行开放将产生积极的促进作用。

► 科普活动

国家同步辐射实验室组织了 2018 年科技活动周。活动期间，实验室共接待近 5000 人来室参观，利用科普图片展板、模型展示、实地参观和趣味知识问答等多种形式，为

公众奉献内容丰富、形式多样的科技大餐,吸引了各地、各年龄段科技爱好者的参观。

本年度,实验室举办了第八届光子科学夏令营,共 79 名来自哈尔滨工业大学、厦门大学近 50 所全国各高校的学生参加了本次夏令营。

大事记

3 月 12-14 日,成功举办“基于超短电子束团的相干辐射与自由电子激光国际研讨会”;

3 月 15-16 日,圆满完成财政部部署的合肥光源 2017 年度重大科学与工程运行维护专项绩效评价工作;

4 月 14-16 日,实验室承办的中国科学技术大学第二届“墨子论坛”——光子科学与技术分论坛顺利召开;

5 月 19-20 日,国家同步辐射实验室举办 2018 年度科技活动周;

6 月 20 日,合肥先进光源预研工程首次监理会顺利召开;

6 月 28 日,实验室承办的中国物理学会同步辐射专业委员会第五届委员会会议成功召开;

7 月 25 日,合肥光源正式启动恒流运行模式;

7 月 29-30 日,合肥光源 2018 年用户学术年会成功召开;

9 月 2-5 日,成功举办“同步辐射谱学在能源材料中的应用”国际学术研讨会;

9 月 13 日,中国科学院党组副书记侯建国调研国家同步辐射实验室;

11 月 18-20 日,成功召开相干光源和科学国际研讨会(2018);

12 月 28 日,合肥光源 2018 年运行年会成功召开。

单位通讯录

地址:合肥市合作化南路 42 号

邮编:230029

网址: <http://www.nsrl.ustc.edu.cn>

电话:0551-63602034, 0551-63602018

联系人: xiayi@ustc.edu.cn

编委及责任编辑

编委:陆亚林

责任编辑：夏轶