

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”）。

国家同步辐射实验室一期工程 1984 年 11 月 20 日破土动工，1989 年建成出光，1991 年 12 月通过国家验收，总投资 8,040 万元人民币。1999 年国家投资 11,800 万元人民币进行国家同步辐射实验室二期工程建设，2004 年 12 月二期工程通过国家验收。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研究提供了一个优良的实验平台，取得了一系列研究成果。

2010-2015 年，为了向用户提供更好的实验条件，在中国科学院和中国科学技术大学的共同支持下，合肥光源进行重大维修改造。重大维修改造完成后，储存环束流发散度显著降低，光源稳定性明显改善，接近三代同步辐射光源水平；可用于安装插入元件的直线节数目由 3 个增加到 6 个，根据用户需求增至 5 个插入元件产生高品质同步辐射。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，为国内各领域科学家提供长期、可靠、稳定的技术支撑。

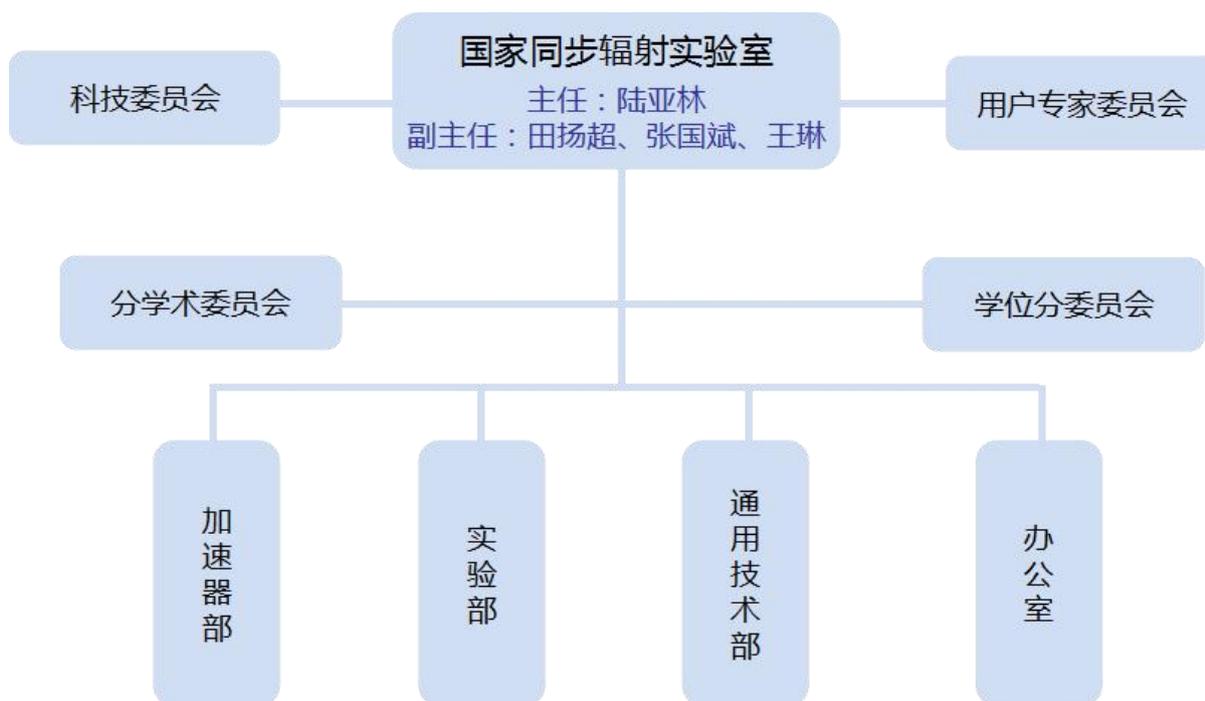
主要研究目标

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。

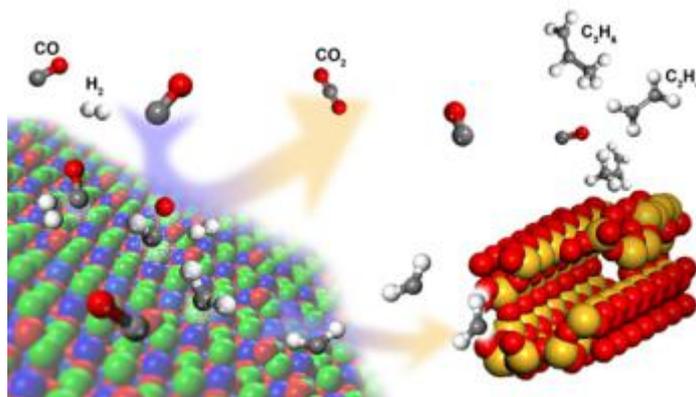
2016 年 NSRL 发表论文 195 篇，其中 1 区 43 篇，发表在 Nature, Science, Journal of the American Chemical Society, Nature Communication, Angew. Chem. Int. Ed, Advanced Materials 等国际著名期刊上。

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
106	-	190	92	-	14	2	-

● 合成气一步高效转化制高值化学品

烯烃作为一种基础化工原料，与人民的日常生活息息相关。我国是烯烃消费的大国，生产烯烃的原料主要依赖石油，这不仅使烯烃的生产成本居高不下，同时也严重的影响到了我国的能源安全。国内外科学家们一直致力于从储量相对丰富和价格低廉的煤炭直接制备烯烃的研究。中国科学院大连化学物理研究所包信和院士和潘秀莲研究员带领团队创制了一种过渡金属氧化物和有序孔道分子筛复合催化剂，成功实现了煤基合成气一步法高效生产烯烃，产物中 C₂ 到 C₄ 低碳烯烃单程选择性超过 80%，打破了传统费托过程 58% 的极限。相关研究成果在《科学》(Science [351:1065—1068]) 杂志上发表。《科学》同期以“令人惊奇的选择性”为题刊发了专家评论和展望，称赞该研究在原理上的突破将带来在工业上的巨大竞争力，被产业界同行誉为“煤转化领域里程碑式的重大突破”。

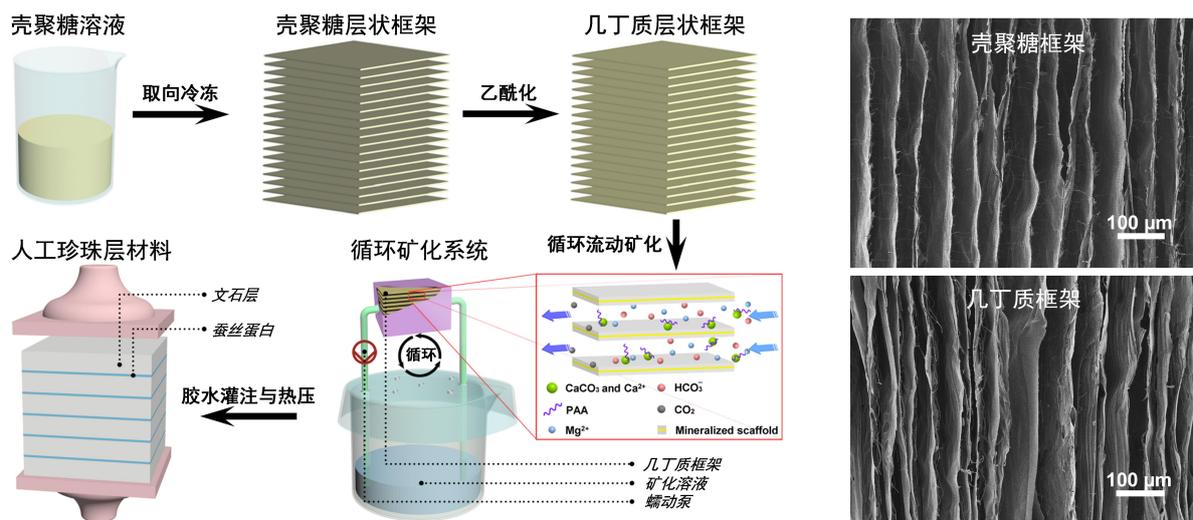
我室潘洋副研究员等人历时近一年攻关，发展出原位催化反应器和基于同步辐射光电离质谱技术的在线催化反应诊断方法，与大连化物所研究人员一起探测到合成气催化转化中乙烯酮（ CH_2CO ）等关键活泼中间产物，为揭示该催化反应新机理提供了关键证据之一，为催化剂优化提供了理论基础。



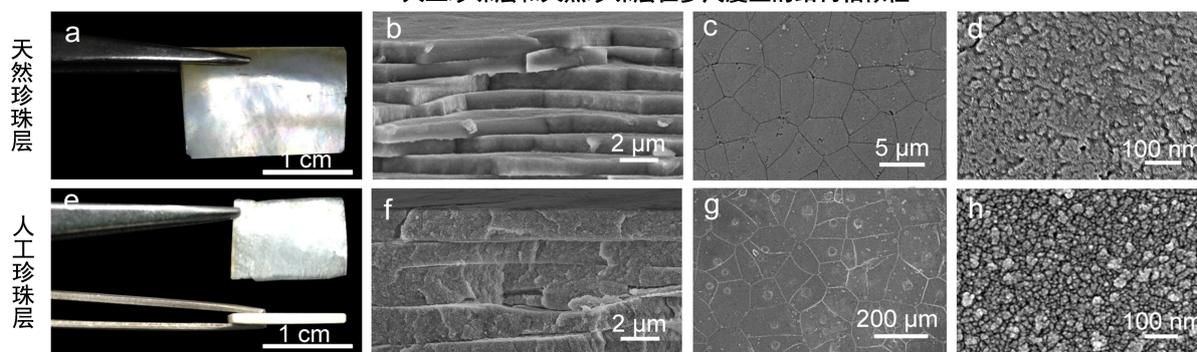
煤基合成气直接制烯烃取得突破

● 人工珍珠母的制备

自然界通过对材料微纳结构的设计实现高强度生物结构材料的制备。然而，如何在温和条件下人工制备与天然结构材料高度类似的宏观块材仍是一个巨大挑战。中国科技大学化学系俞书宏教授团队提出了一种全新的“组装与矿化”相结合的介观合成新方法，首次利用模拟生物矿化法制备出人工珍珠母块体材料。通过与同步辐射国家实验室CT成像站合作，对材料的结构进行了成像表征，识别并确认了其天然珍珠母非常相似的微观尺度交替层状有序结构，并以此结构为基础分析了其兼具较高的韧性、强度的原因。相关成果发表于Science (Science, 2016, 354(6308), 107)，同期配发的Perspective称“该矿化方法是一项突破性进展”。



人工珍珠层和天然珍珠层在多尺度上的结构相似性

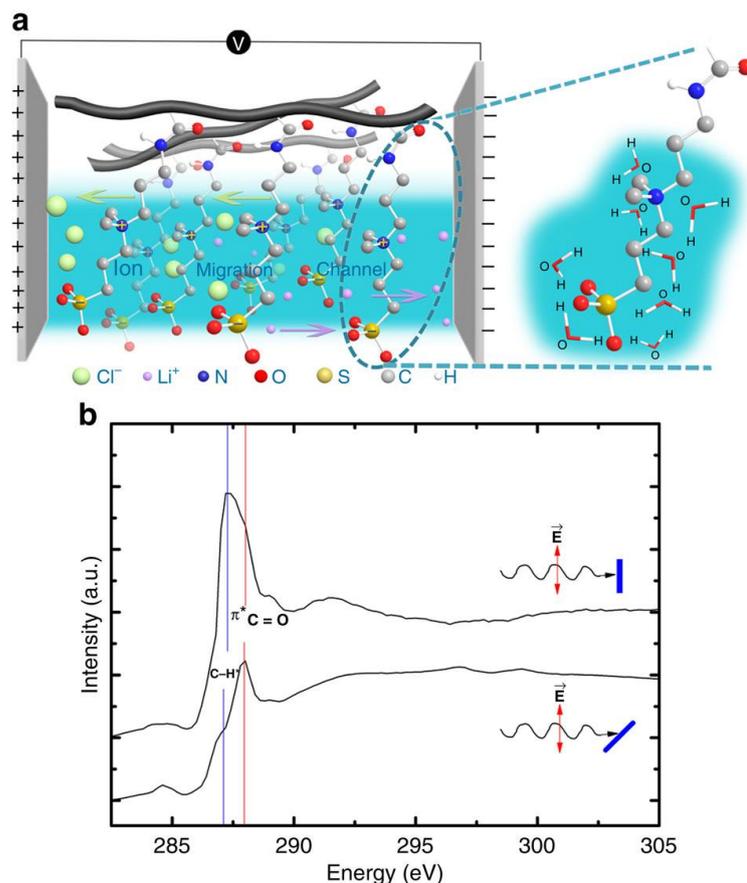


(a) 人工珍珠层的 SEM 照片, (b) 人工珍珠层的 CT 断层图

● 用于全固态超级电容器的凝胶电解质取得重要进展

面对日益增长的能源需求，全固态超级电容器作为新型储能设备得到了广泛关注，而凝胶电解质是其中的关键技术材料。为了实现全固态超级电容器快速充放电和高稳定性的需求，发展兼具高离子电导率、优良机械强度和高稳定保水性能等诸多优势的新型凝胶电解质是该领域的核心科学问题。中国科学技术大学吴长征教授课题组，利用国家同步辐射实验室软 X 射线表征并设计了具有独特离子通道的新型两性凝胶电解质 PPDP 用于全固态超级电容器，获得了目前石墨烯基全固态超级电容器的最优性能。相关成果发表在 *Nature Communications*, 7:11782(2016)上。在这个工作中，角度依赖的 X 射线吸收谱学技术表明两性凝胶电解质在外加电场的情况下形成了离子通道，为深入了解 PPDP 在固体电容器中的作用提供了直接证据。

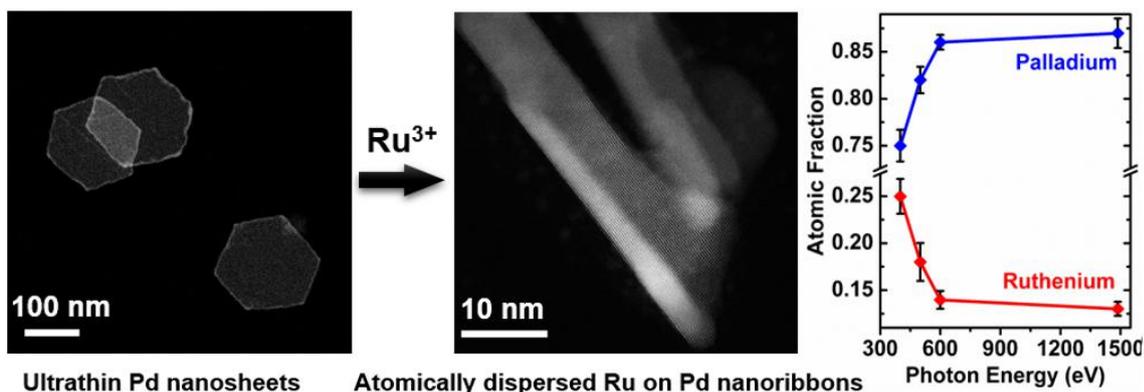
当 PPDP 凝胶电解质在应用于电极材料上时，外界电场会使得它形成离子通道；同时，PPDP 会因为它的两性基团和水分子之间产生的明显水化作用而具有很好的保水能力。(b) PPDP 样品在外加电场后的 C 的 K 边 X 射线近边吸收谱，具有角度依赖性。



当 PPDP 凝胶电解质在应用于电极材料上时，外界电场会使得它形成离子通道；同时，PPDP 会因为它的两性基团和水分子之间产生的明显水化作用而具有很好的保水能力。(b) PPDP 样品在外加电场后的 C 的 K 边 X 射线近边吸收谱，具有角度依赖性。

● 超薄钯纳米带上负载的原子级分散的钌

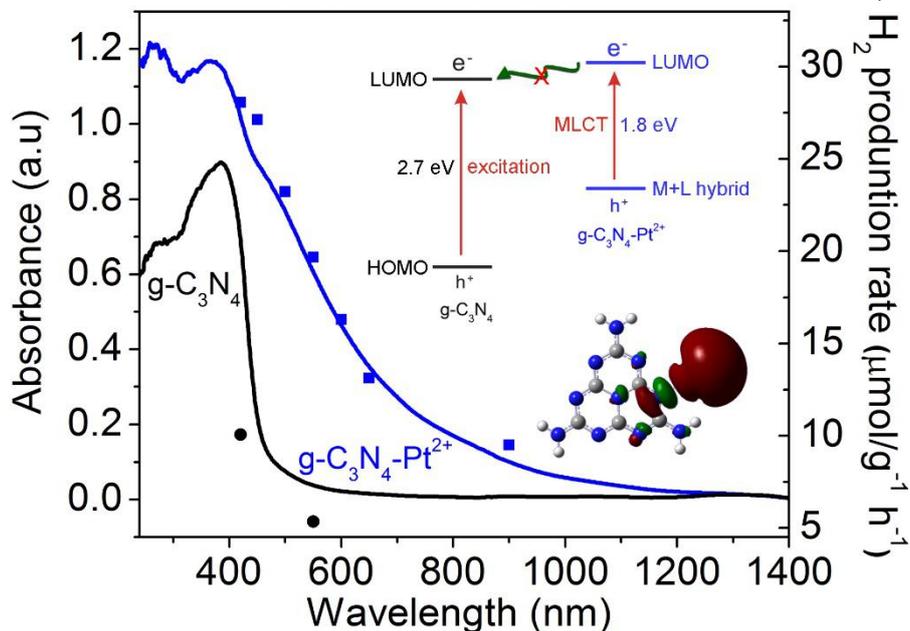
当原子级分散的贵金属负载在另一种贵金属上时，两种贵金属间存在的协同作用会显著提高催化性能。尽管此种催化剂与传统的双金属催化剂相比表现出更优异的催化性能，但是受限于其合成方法、负载量等技术方面的难题，其制备与应用研究仍是非常具有挑战的课题。最近，清华大学李亚栋院士与中国科学技术大学洪勋副研究员合作，制备了一种超薄钯纳米带上负载的原子级分散的钌催化剂，且负载量高达 5.9 wt%。他们利用合肥光源的催化与表面科学实验 (BL11U) 的同步辐射光子能谱 (SRPES) 分析了 Ru/Pd 催化剂的组分分布，同时结合利用球差电镜和、SRPES、XAFS 等技术证明了钌原子级分散在钯纳米带的表面。这种高负载量的单原子在选择性氢化烯烃官能团反应中实现高活性的同时，能够选择性的抑制氧苄基保护基氢解作用的发生，实现选择性氢化反应的高效生产。相关论文发表在《美国化学会志》(J. Am. Chem. Soc. 2016, 138, 13850–13853) 上。



超薄钯纳米带上负载的原子级分散的钌

● 基于同步辐射表征技术的新型广谱光催化制氢材料研究

光催化分解水制氢技术是一种可以直接将太阳辐射能转化为氢能的途径，目前其应用主要受限于催化剂成本和能量转换性能。针对该挑战，中国科学技术大学熊宇杰教授课题组将配位化学的理念引入于低成本的有机半导体纳米材料中，利用金属-有机半导体的纳米配位结构的电荷转移跃迁过程，与带间跃迁形成了互补型吸光，可以在广谱太阳光范围内进行光催化制氢。利用合肥光源的催化与表面科学实验（BL11U）的同步辐射光子能谱（SRPES）分析了光催化剂的能带结构，同时国家同步辐射实验室的宋礼教授和朱俊发教授分别利用 X 射线吸收精细结构谱和光电子能谱解析出了光催化剂的配位结构及能带结构，结合 X 射线吸收精细结构谱江俊教授的和理论模拟结果，证实了该电荷转移跃迁作用机制。该技术途径的发展为高性能和低成本的广谱光催化材料设计提供了新的视角，发表于国际重要材料期刊《先进材料》（*Adv. Mater.* 2016, 28, 6959）。

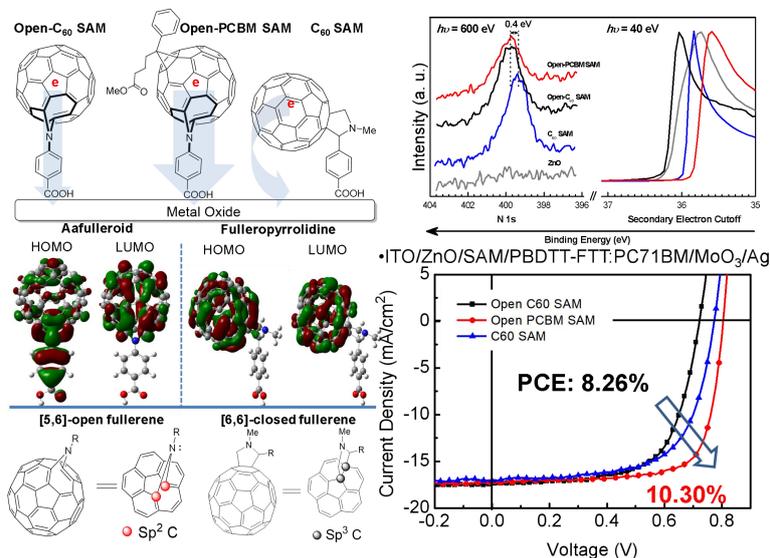


基于纳米配位化学的广谱光催化制氢机制及其性能展示

● 高效提升有机太阳能电池电荷收集效率的界面层

当前最高效率的有机太阳能电池都采用电子传输层/有机光活性层/空穴传输层的倒置型三明治夹层结构，其中，最常用的电子传输层是金属氧化物如氧化锌（ZnO）。但未

修饰的氧化锌自身存在物理、化学缺陷不仅会影响界面接触特性，而且会捕获电荷而降低器件性能。最近，浙江大学李昌治教授和中国科学技术大学国家同步辐射实验室鞠焕鑫和朱俊发等利用合肥光源的催化与表面科学线站（BL11U）合作研究有机-无机界面经单分子层修饰后的能带匹配情形。通过在氧化锌表面引入新型富勒烯分子修饰层，成功增强光活性层和金属氧化物之间的电子耦合，促进器件光电转换效率提升。这些结果（*Adv. Mater.*, 28, 2016, 7269–7275）初步揭示了新型界面材料提高有机太阳能电池性能的

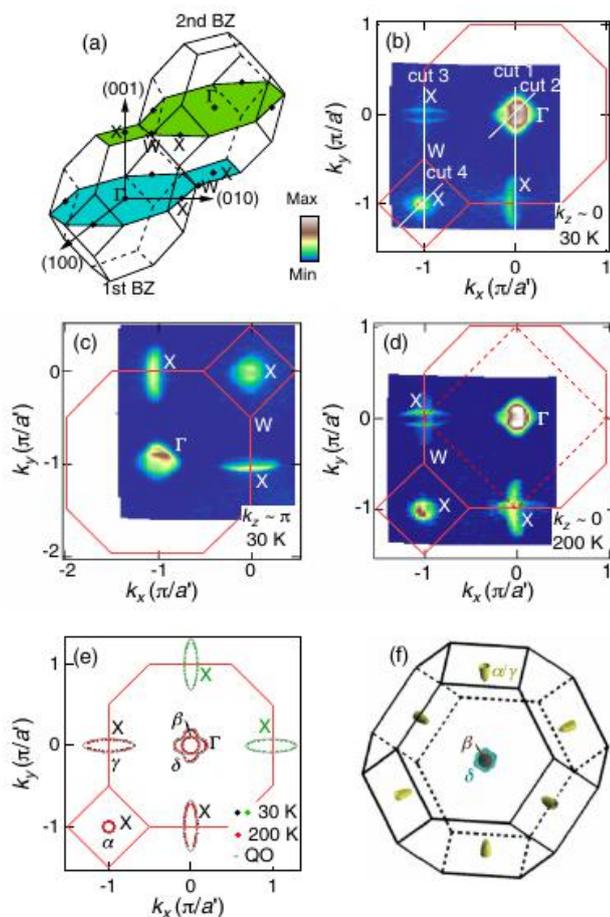


机制，并为开发新型界面修饰材料和制备高效有机太阳能电池提供了新思路。

基于新型富勒烯分子组装层促进有机活性层和金属氧化物间能带匹配和提升器件效率

● 具有极大磁阻材料的电子结构测量

在非磁性半金属 WTe_2 中观察到在高达 60T 的磁场下仍旧没有出现饱和超大磁阻现象（XMR），迅速引起了人们的广泛关注。这些行为也在许多非磁性半金属 $TmPn_2$ （ $Tm = Ta/Nb$, $Pn = As/Sb$ ）、 LnX （ $Ln = La/Y$, $X = Sb/Bi$ ）和 $ZrSiS$ 系列中被观测到。多种机理被提出来解释这类 XMR 现象，但由于许多非磁性半金属的电子结构非常复杂，很难基于这些电子结构进行深入定量的分析讨论。最近，中国人民大学物理系王善才研究组和物理所丁洪研究组在 ARPES 实验站测量了 $LaSb$ 的能带结构。基于角分辨光电子谱（ARPES）和量子振荡实验数据，解析出 $LaSb$ 所有费米面的形状和大小，证明了 $LaSb$ 的空穴和电子型载流子在低温和高温都是完全补偿的，排除了磁阻在高温明显减小起源于载流子非补偿的解释；并且证明 $LaSb$ 是拓扑平庸的，排除了 XMR 起源于拓扑非平庸能带的解释。这些结果为建立理论模型全面定量地理解非磁性半金属中的 XMR 提供了关键的实验数据。这一研究成果于 9 月 16 日在线发表在《物理评论快报》（*Physical Review Letters* 117, 127204 (2016)）上。



(a) LaSb 的三维布里渊区, (b)(c)在 $k_z=0$, 和 $k_z=\pi$ 面内, 低温下费米能附近的强度积分, (d),高温下 (200K) 费米能附近的强度积分图. (e)根据 ARPES 和量子震荡获得的费米面拓扑图。 (f)利用 MBJ 势计算得到的 3D 费米面结构。

设施建设、运行与改造

2016 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	7009.16	189.04	5019.25	1370.83	39928.9	380.65	49.39	0

2016 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	67	191	322	1100	物理学 25% 化学 40% 生物 4%	-

										地质 1%
										材料科学与工程 18%
										工程与技术 2%
										电子科学与技术 1%
										能源 5%
										环境科学与工程 3%

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*	1100	480	615	5	618	477	0	2	0	5

2016 年度是合肥光源重大升级改造后正式运行的第一年，其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

2016 年光源计划运行时间为 7008 小时，计划供光 4752 小时；实际运行时间为 7009.16 小时，供光时间为 5019.25 小时，均超过了年度计划目标。故障机时远低于计划故障机时，开机率 99.03%，平均无故障时间 91.26 小时，远高于国际公认的 95% 和 50 小时的优秀水平；运行流强实现稳步提高，目前稳定运行在 360mA。

通过机器研究，优化了基于束流的四极磁铁磁中心测量方法的测量方法，测量精度提高到~20 μ m，在机器维护周期中定期进行储存环四极磁铁磁中心测量，保证了长期运行中束流轨道的高重复度；优化了束流轨道反馈控制程序，同时通过数字化电源的数控板卡程序的升级，明显改善了校正磁铁电源动态、静态特性，在机器维护中通过改进 BPM 信号传输电缆连接方式提高了轨道测量分辨率，最终合肥光源运行期间束流轨道的稳定度优于 2 μ m。发展了扫描束流轨道的束流清洗方法，促进了光解析，提高清洗效率，束流寿命大幅度改善，300mA 束流 1/e 寿命超过 8 小时，优于设计目标。

同时，还实现了各个系统的性能提升，有力地保障了光源运行的可靠性。包括：（1）改进高次谐波腔的腔压控制模式，发展了基于 EPICS 的数字 PID 反馈控制系统，不仅解决了原有 BINP 模拟腔压控制无备品备件、无元器件的维护维修男问题，而且反馈效果有显著提高，有效地控制了谐波腔腔压，消除了腔压变化对束流的影响，保证光源运行稳定。（2）研究了基波高频系统工作状态与棚屋温度的关系，优化棚屋内冷风流向和高频腔冷却水系统的控制参数，有效地改善了高频腔的温度稳定性，减少了短时间温度波动对高频腔的影响，避免在高频低电平反馈系统的控制下现有高频腔的调谐杆频繁动

作导致的容易打火、容易卡死的问题，提高了光源运行的可靠性。(3) 在储存环主磁铁电源的动态特性优化的基础上，对于注入器磁铁电源的数学控制算法进行了升级，改善了电源的静态和动态特性，电源的时间常数由原来的 1s 缩短到 100ms，变化曲线光滑，为保障在 top-off 运行模式下注入束流的稳定性创造了更好的条件。(4) 优化了逐束团反馈系统，提高了束流运动的稳定性。(5) 发展和完善了基于同步光成像方法和基于同步光干涉方法的束流发射度测量系统，并将原有基于 windows 系统的束测系统控制软件更新为基于 EPICS 的在线测量系统，实现了系统的在线标定、参数在线测量以及数据共享等功能。

2015 年合肥光源获批并启动供电系统改造项目，其主要建设内容包括：改造目前的高压 10kv 单回路进线为 10kv 双回路供电；全面升级更换型号老旧、能耗巨大的变配电设备如变压器、高、低压配电柜等。2016 年度，利用春节停机和暑期停机时间，先后完成了供电系统的双回路供电改造、高压和低压配电柜建设、电力系统检测建设等内容，并进行总体联机调试，全部性能指标达到了项目任务目标，有力地保证合肥光源稳定运行。

➤ 开放共享

2016 年，实验室积极主动开拓全方位交流渠道，通过合作交流研究、用户年会、用户培训班、专题研讨会等形式，邀请高水平用户积极参与实验室的建设，注重倾听高端用户对线站建设、实验技术发展的建议和需求。先后召开了校内同步辐射应用研讨会，同步辐射生命和物质科学交叉领域应用研讨会，硬、软 X 射线吸收谱学及应用研讨会等。

2016 年 8 月，召开了 2016 年度用户会议，这是合肥光源顺利完成重大维修改造项目并正式运行开放后首次举办的用户年会，来自 66 家单位的 235 名代表参加了会议，与 2015 年试运行期间相比均有大幅度的提升。

2016 年 8 月，召开用户专家委员会。会议由用户委员会副主任封东来主持，十八位专家委员出席会议。

➤ 维修改造项目执行情况

“合肥光源供电系统改造”，一期工程主要内容为更换 5 台 800KVA 变压器、48 台低压配电柜、封闭式母线槽、设备基础及电缆接续等。3 月 10 日进行了验收。二期工程主要内容为 10KV 高压备用专用线建设、18 台高压开关柜及直流操作系统。目前正在稳步推进。

“合肥光源恒流运行关键系统改造”，主要内容为通过对一些系统或设备的进一步维修改造，实现合肥光源恒流模式运行。项目于 2016 年 6 月启动，目前软件测试已基本完成，硬件改造正按计划进行。

科技队伍与人才培养

设施	按岗位分	按职称分	学生	在站	引进
----	------	------	----	----	----

人员总数	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	博士后	人才
177	126	43	8	71	61	45	25	37	283	24	0

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“杰青”等高端人才的力量，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。

合作与交流

➤ 技术合作与交流

实验室与中科院近代物理所签署共建“加速器物理与应用联合研究中心”，将重点在国家“十二五”重大科技基础设施设计和建设、粒子束治癌相关的探测与成像技术研究和国产医用粒子束加速器研制以及相关专业的人才培养与交流等方面开展合作。

➤ 国际合作

2016 年，实验室认真组织申报并获批 2 个国家外国专家局外国文教专家项目。邀请了来自美国、意大利、德国、法国、日本等多个国家的同步辐射领域专家来我室进行学术交流。

9 月 29 日，我实验室客座教授外国专家凯瑟琳娜·科瑟-赫英郝斯教授获颁 2016 年度中国政府友谊奖。科瑟-赫英郝斯教授是国际燃烧诊断领域权威专家，自 2003 年起与我实验室燃烧研究团队开展了卓有成效的国际科技合作。

在加强外国知名专家请进工作的同时，鼓励实验室的研究人员积极走出去，拓展眼界、提高知名度，2016 年近 30 人次出访参加国际会议及进行合作交流，并有多人次受邀在国际大会上做邀请报告。

12 月 15-22 日，实验室主任陆亚林教授访问了美国休斯顿大学、世界著名光源 ALS（美国先进光源）和 UVSOR（日本分子科学研究所），就双方在软 X 射线衍射极限储存环、超导磁体设计和工艺、低能储存环升级以及人才联合培养等方面的深度合作展开了深入讨论。

本年度研究生出国参加国际会议或进行合作交流近 60 人次，并申请获得优秀学生国际交流计划、樱花科技计划、博士生联合培养项目、博士生国际会议交流资助计划等项目资助。

➤ 学术交流会议

2016 年实验室成功举办的重要学术会议有：

“第二届基于衍射极限储存环的软 X 射线应用国际研讨会”。会议主席由实验室主任陆亚林教授和美国先进光源 ALS 副主任 Steve Kevan 教授共同担任。会上，世界著名同步辐射光源的近二十位专家参会并做精彩的大会报告。会议吸引了来自全球的 110 余位代表参加，主要探讨了近年来衍射极限储存环光源技术的最新进展、基于衍射极限储存环光源的软 X 射线前沿实验技术进展及其科学应用。

“第四届两岸同步辐射学术研讨会”。来自海峡两岸的研究团队，通过口头报告、海报展示和现场讨论等形式，介绍各自科研成果以及其研究领域的最新进展，并进行充分讨论交流。

“THz 自由电子激光研讨会”。来自国内外知名大学和科研院所的科研人员和国家同步辐射实验室相关科研人员参加了本次研讨会，促进了 THz 相干辐射源及相关技术方面的研究深入发展及国内外相关合作交流。

► 科普活动

国家同步辐射实验室组织了 2016 年科技活动周。据统计，活动期间，实验室共接待 6000 余人来室参观，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。

国家同步辐射实验室举办第六届光子科学夏令营，来自四川大学、哈尔滨工业大学、郑州大学等全国 31 所高校的学生参加了本次夏令营。

大事记

1 月 5 日，中国科学院重大科技基础设施维修改造项目“合肥光源重大维修改造项目”通过中国科学院条件保障与财务局组织验收；

3 月 4 日，合肥光源高端用户在煤气化直接制烯烃研究中获得重大突破；

5 月 14-20 日，举办 2016 年科技活动周；

8 月 16-18 日，召开“2016 年合肥光源用户学术年会”；

8 月 17-19 日，举办“第二届基于衍射极限储存环的软 X 射线应用国际研讨会”；

8 月 22-23 日，召开“合肥光源 2016 年度运行会议”；

10 月 16 日-18 日，举办“第四届两岸同步辐射学术研讨会”；

11 月 23 日，安徽省委常委、合肥市委书记宋国权一行实地考察国家同步辐射实验室；

12 月 4 日，安徽省委副书记信长星一行实地考察国家同步辐射实验室；

12 月 22 日-23 日，举办“THz 自由电子激光研讨会”。

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