

中国科学技术大学

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”)。其主体设备是一台能量为 800MeV、平均流强为 300mA 的电子储存环,一台能量 800MeV 的电子直线加速器作注入器。

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。在过去 20 多年的开放过程中,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。

2010-2014 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,合肥光源进行重大升级改造。重大升级改造完成后,储存环束流发散度显著降低,光源稳定性明显改善,首批建成燃烧、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等五条光束线及实验站。此外还有 6 个出光口为未来发展预留空间。

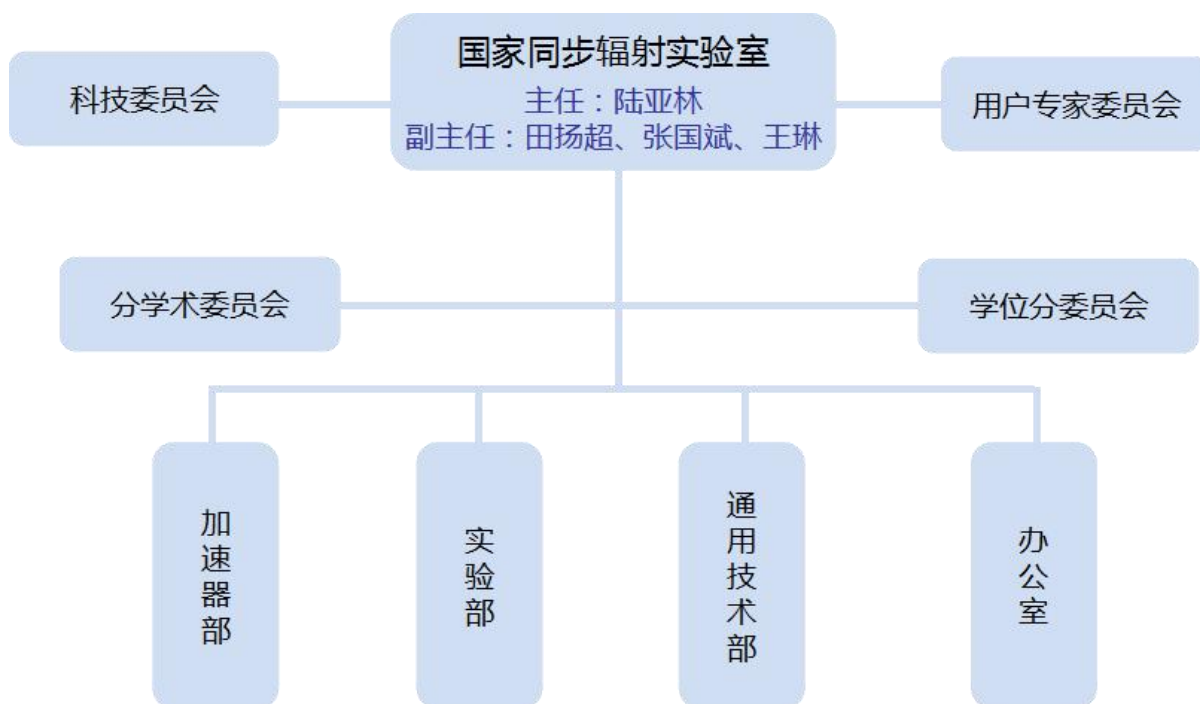
作为国家大科学装置和合肥大科学中心的重要组成部分,NSRL 将继续面向国家战略需求和前沿基础科学研究,为国内各领域科学家提供长期、可靠、稳定的技术支撑。

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,重点发展能源高效利用、节能材料、大气环境、纳米科技、量子调控、物质与生命交叉等前沿学科领域的前沿课题研究,同时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。

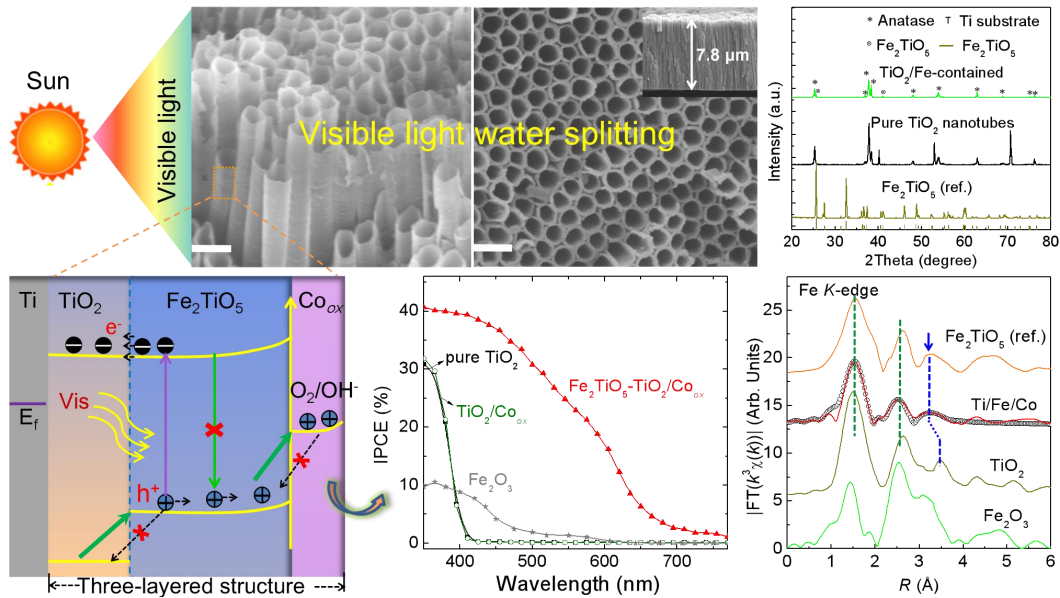
2014 年 NSRL 发表论文 132 篇，其中影响因子大于 3.0 的 59 篇，1 区 22 篇，发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.*, *Biotechnology Advances*, *Nanoscale*, *Carbon*, *Macromolecules* 等国际著名期刊上。

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
88		108	16		4	1	

● 同步辐射技术在研究太阳能转化功能材料方面取得重要进展

通过太阳能光解水的“人工光合作用”将太阳能转换为清洁的氢能，被认为是 21 世纪解决化石能源危机最有效的途径之一。有效提升光电催化剂的可见光量子转换效率是该领域内的核心问题，也是促进太阳能光解水制氢技术工业化应用需要解决的关键问题。目前在光电催化剂内部产生的光生载流子的迁移距离较短、复合率非常快，这极大限制了太阳能的有效转化和利用。针对这一科学难点问题，合肥国家同步辐射实验室由刘庆华副研究员、何劲夫博士和姚涛研究员等组成的研究团队在韦世强教授的带领下，利用同步辐射 X 射线吸收谱学 (XAFS) 技术研究了低维纳米光电催化剂材料的原子局域结构和电子结构，明确了表面结构扭曲对材料内部光生载流子迁移路径的影响规律，在解决低维金属氧化物纳米功能材料在光解水应用方面取得了重要进展。他们通过设计窄禁带半导体 Fe_2TiO_5 包覆 TiO_2 纳米管阵列的复合结构，在 $\text{Fe}_2\text{TiO}_5/\text{TiO}_2$ 之间形成载流子分离界面，成功地将光生空穴从材料内部

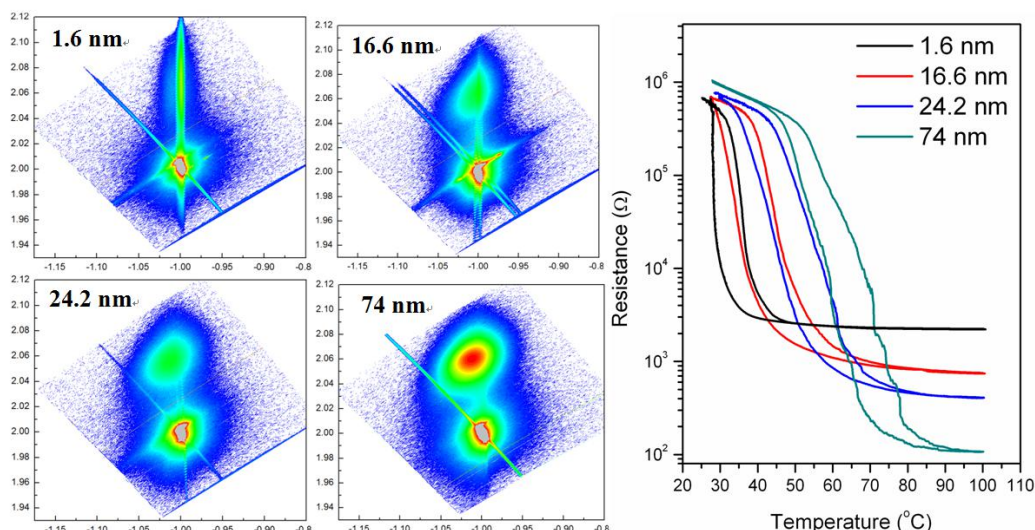
定向迁移到表面催化反应活性位点，使其在可见光 400 至 600nm 波段的量子转换效率高达 40%以上，总的能量转换效率达到 2.7%（见图 1）。同步辐射 XAFS 等技术证实了 $\text{Fe}_2\text{TiO}_5/\text{TiO}_2$ 界面的“矢量迁移通道”能级结构是实现光生载流子定向迁移的原因，该成果发表在《Nature Comms. 5, 5122 (2014)》，极大地丰富了人们利用能带工程来改善光解水可见光量子效率的认识，为进一步调控氧化物半导体光催化剂水分解性能提供了新思路。



Fe_2TiO_5 - TiO_2 的形貌结构与构效关系示意图

● 同步辐射衍射技术揭示二氧化钒薄膜应力调控相变机理

二氧化钒(VO_2)材料表现出独特的可逆的金属绝缘体相变，在相变存储和“智能窗”的应用上具有极大的前景。但是这种相变临界温度为 68°C ，作为实际应用仍然相对过高。因此调控 VO_2 相变过程，从而降低相变温度一直是研究的热点问题。利用薄膜外延沉积的手段在 VO_2 薄膜内产生界面应力，从而降低其相变温度被证明为一个可行的手段。但是界面应力的引入对 VO_2 薄膜晶格结构的影响以及相应电子态的调控机理仍不清楚。针对上述问题，功能氧化物薄膜材料课题组利用氧射频分子束外延方法在二氧化钛单晶衬底上成功制备了不同厚度的外延 VO_2 薄膜并测试了其金属绝缘体相变特性。同时利用同步辐射衍射倒空间成像技术研究了这种超薄膜的界面应力变化的动力学过程，深入揭示了这种界面应力对其相变过程的调控机理。该项工作利用同步辐射光源优势对 VO_2 的应力相变调控给出了更加深入和清晰的物理图像，对 VO_2 的相变行为研究具有重要指导意义。(Nano Letters 2014, 14, 4036)

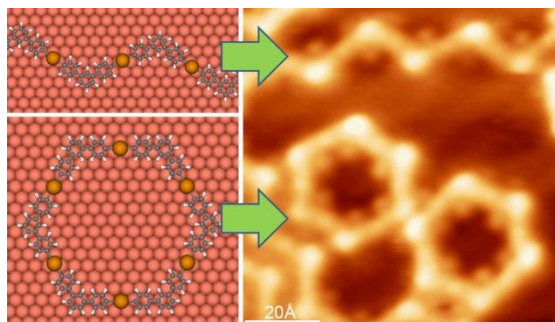


(左图) 基于同步辐射 x 射线衍射技术得到的不同厚度 VO_2 外延薄膜的倒空间成像 (RSM) 图;

(右图) 不同厚度 VO_2 外延薄膜的电阻-温度曲线。

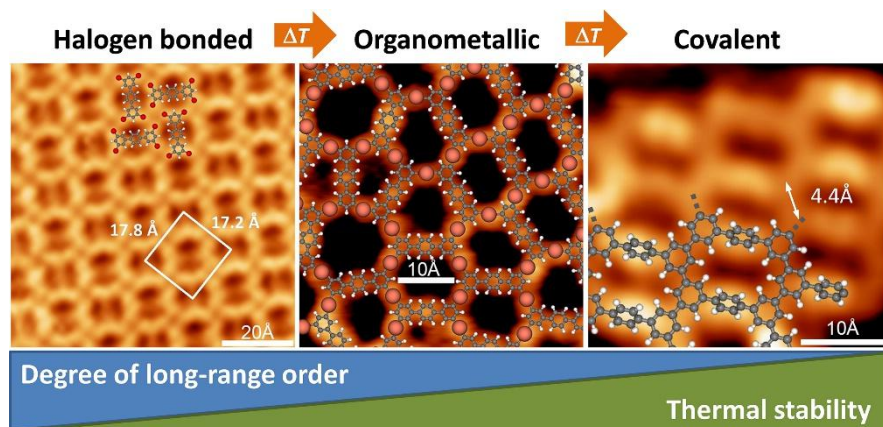
● 同步辐射光电子能谱研究有机分子在金属或氧化物表面的自组装和反应

众多研究表明,有机光电器件的效率与有机分子薄膜的有序度和取向密切相关。为了获得表面有序的有机纳米结构,中国科学技术大学国家同步辐射实验室表面科学课题组利用 STM (扫描隧道显微镜) 与 XPS (X 射线光电子能谱) 研究 4,4'-二溴-间三联苯 (DMTP) 分子在 Cu(111) 表面的乌尔曼反应、迁移以及自组装行为并利用衬底的模版作用成功合成出目标有序有机纳米结构。该研究提出了一种表面辅助合成基于 C-金属-C 键的金属有机低聚体和聚合物的方法,并展示了许多种类的环形化合物。该成果发表在 ACS Nano 2014, 8, 709 上。



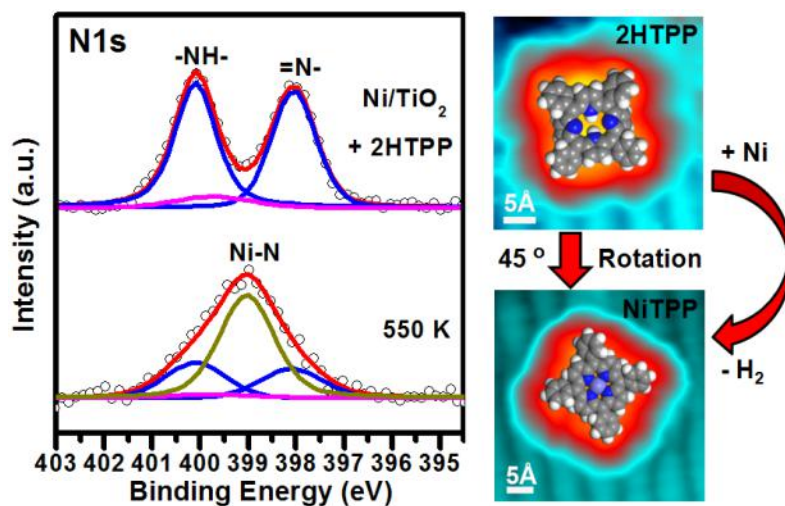
DMTP分子在Cu(111)表面自组装反应形成有序纳米结构的示意图

该课题组还研究了在不同的温度下,以 3,5,3',5'-四溴-对三联苯 (TBrTP) 分子作为前驱体在表面上组装获得了分别以共价键、金属有机键和卤键结合的纳米网状结构。对比三种不同的键合方式形成的纳米网状结构,发现前驱体分子间的键合方式越强,其所形成的结构的长程有序度就越低。该成果发表在 J. Phys. Chem. C. 2014, 118, 13018。



TBrTP 分子在 Cu(111) 表面上的自组装反应形成不同结构有序纳米结构的示意图

此外,该组还利用 XPS 和 STM 研究了四苯基卟啉 (tetraphenylporphyrin, 2HTPP) 在 $\text{TiO}_2(110)$ 表面的吸附及与金属 Ni 反应生成 NiTPP 的过程。发现 2HTPP 在 $\text{TiO}_2(110)$ 表面上吸附时,分子的中心吸附在 Ti^{4+} 列上形成“马鞍”型,2HTPP 与 Ni 原子络合后生成的 NiTPP 则在表面上吸附成四瓣型。该成果近期发表在 Chem. Commun. 2014, 50, 8291。

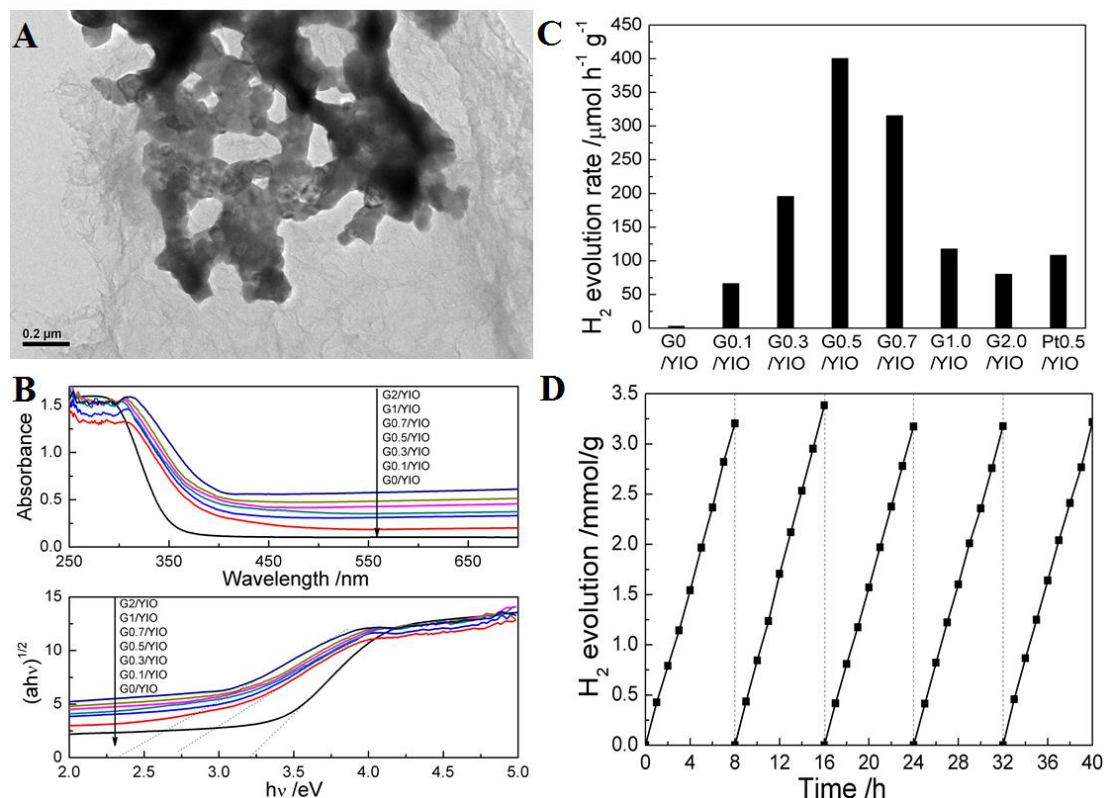


$\text{TiO}_2(110)-1 \times 1$ 表面 2HTPP 与 Ni 发生络合反应的 N 1s XPS 谱图以及 STM 图

● 石墨烯/半导体复合光催化纳米材料的研究进展

石墨烯基复合光催化材料已成为当前光催化领域的研究热点之一,然而目前所报道的此类复合材料由于自身结构及功能缺陷,普遍具有较低的光生载流子分离效率和较差的光催化活性。组合材料学及应用课题组设计构建了一种石墨烯/ YInO_3 复合光催化剂,通过溶剂热法将 YInO_3 纳米颗粒均匀分散于石墨烯的平面二维结构中。由于石墨烯和 YInO_3 费米能级之间的差异,光生电子可以从 YInO_3 的导带迁移至石墨烯的表面,实现光生载流子在空间上的有效分离。同时,石墨烯与 YInO_3 之间的化学键合作用还将 YInO_3 的吸收带红移至长波波段,拓宽复合光催化剂对可见光的吸收范围。光催化实验结果表明,石墨烯的负载显著提高了在可见光下分解水制氢的性能,其中 G0.5/ YInO_3 在可见光下的产氢速率达到 $400 \mu\text{mol/hg}$,分别是纯 YInO_3 和 Pt0.5/ YInO_3 的 127 和 3.7 倍。同时,G0.5/ YInO_3 复合光催化剂还在可见光下表现出良好的光催化稳定性。该复合光催化剂在有效促进光生载流子分离和显著增强光

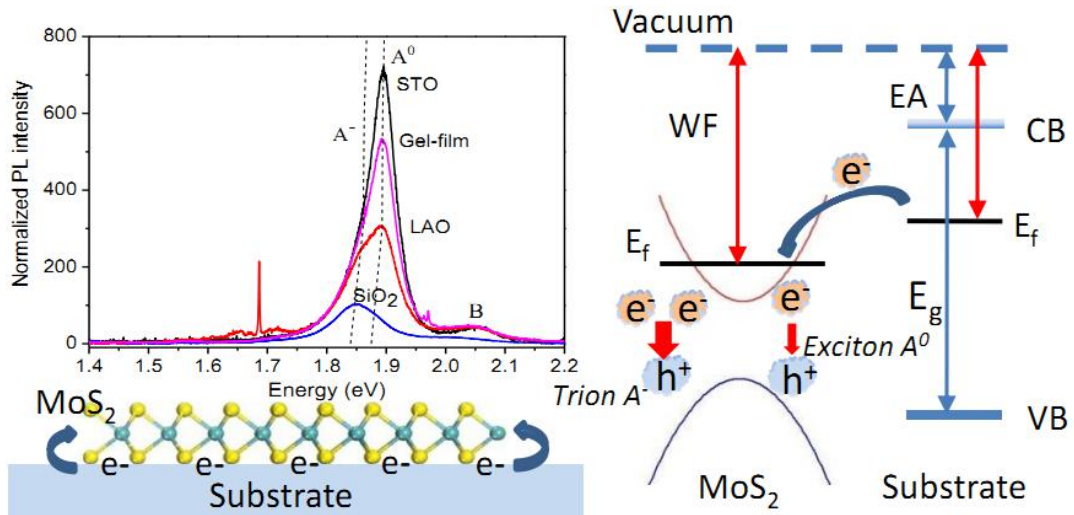
催化性能的基础上, 还实现了对 YInO_3 电子能带结构的调控, 在半导体光催化领域具有很高的潜在应用价值。相关研究工作发表于 *Nanoscale* 2014, 6, 2299。以上研究工作得到国家自然科学基金、科技部“973”项目、安徽省自然科学基金等基金的资助。



石墨烯/ YInO_3 复合光催化剂的TEM (A)、吸收光谱(B)、光解水制氢性能(C)和G0.5/ YInO_3 的光催化稳定性(D)

● 介电衬底的电荷传递效应对单层 MoS_2 发光性质的影响

当层状材料 MoS_2 的厚度减小到原子层厚度时, 其电子结构发生明显的变化, 从间接带隙半导体转变成直接带隙半导体, 从而产生显著的发光现象。因此, 这类材料在光电器件等领域有着重要的潜在应用。在实际器件中, 通常单层 MoS_2 放置在介电衬底上, 形成单层 MoS_2 /介电衬底的异质结构, 这样单层 MoS_2 的物理性质将受薄膜和衬底间的相互作用影响。为了深入理解这种相互作用, 中国科学技术大学国家同步辐射实验室研究课题组利用机械剥离的方法在 SiO_2 , Gel-film, LaAlO_3 和 SrTiO_3 衬底上制备了单层 MoS_2 , 通过 Raman 和光致发光方法系统地研究了单层 MoS_2 和衬底之间的相互作用。Raman 谱显示衬底对 MoS_2 的 Raman 振动模式影响很小, 意味着弱的应力相互作用。然而, MoS_2 发光却呈现出显著的衬底依赖, 源于衬底和单层 MoS_2 之间的电荷传递。在这四种衬底中, SiO_2 引入最多的电荷, 而 SrTiO_3 引入最少的电荷。通过选择不同的衬底, 能够在单层 MoS_2 中引入不同量的电荷, 从而改变中性激子和带电激子的发射。他们利用能带图模型解释了电荷传递效应与衬底费米能级及 MoS_2 功函数之间的关系。该工作说明衬底电荷传递效应会显著影响单层 MoS_2 的发光特性, 在器件设计 and 应用时必须考虑。同时, 它也为通过衬底工程调控单层 MoS_2 发光性质提供了可行的便利途径。这项研究成果发表在 *Nanoscale* 杂志上。(Nanoscale 2014, 6, 15248-15254)

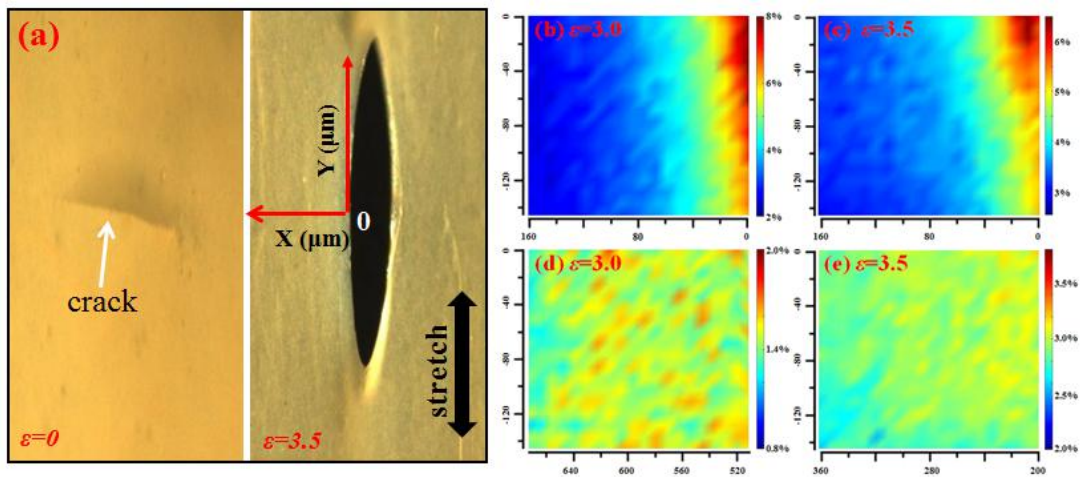


通过衬底电荷传递调控单层 MoS₂ 的发光性质

● 同步辐射微聚焦 X 射线衍射原位研究高分子结晶

中国科学技术大学国家同步辐射实验室软物质智能制造研究团队采用同步辐射微聚焦显微技术研究高分子结晶中取得了一系列重要进展。流动场诱导结晶是指导高分子材料加工的理论基础，也是至今还未解决的非平衡相变问题。其中争议的问题之一就是结晶前是否存在介于晶体和熔体之间的预有序结构。研究组利用自主研制的纤维剪切装置与微焦点 X 射线显微技术联用，充分发挥微聚焦 X 射线高空间分辨 ($4.9 \times 5.3 \mu\text{m}^2$)、高亮度的优势，获得存在非晶预有序目前最为直接的实验证据。同时建立纤维周围预有序分布及其随时间的演化过程，发现预有序的结构具有强烈的温度依赖性 (Macromolecules 2014, 47, 4408 - 441)。

针对天然橡胶结晶自增强的微观机理，研究组研制了与微焦点 X 射线联用的微型拉力装置，利用微焦点 X 射线高空间分辨的优势获得天然橡胶在不同应变下缺口周围二维结晶度分布，发现缺口周围存在软硬交替的双网络结构 (如图所示)。双网络结构可以避免缺口周围的应力集中，增加材料的韧性。定量计算发现在应变 5.5 时断裂能增强系数增幅达 3 个数量级。这一工作揭示天然橡胶自增强源于分子熵弹性、纳米尺度结晶相变焓弹性和微米尺度软硬双网络多尺度协同效应。(Scientific Reports 2014, 4, 7502)

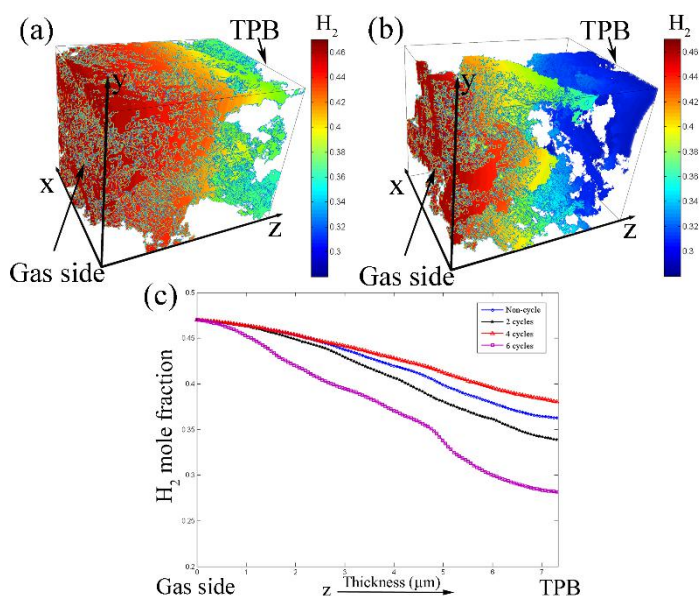


(a) 天然橡胶在拉伸前和拉伸至应变 3.5 时缺口周围的显微镜照片；(b)-(e) 不同应变下缺口边缘和原理缺口时的局部结晶度分布。

● 基于 X 射线成像与格子-玻尔兹曼模型研究固体氧化物燃料电池电极结构对其性能的影响

固体氧化物燃料电池 (SOFC) 作为一种新型的、洁净的能源, 是潜在的可能解决能源利用率低和环境污染双重问题的高新技术。但是由于现阶段燃料电池的工作温度很高 (500-1000°C), 而且工作条件非常复杂, 因而了解电极结构对其性能的影响是十分必要的。中国科学技术大学国家同步辐射实验室成像课题组利用 X 射线成像方法系统的研究了燃料电池电极的三维结构以及对其电性能的影响, 取得了较好的进展。最近, 课题组基于 X 射线成像技术发展了一种无损研究燃料电池的三维结构, 可以获得反应燃料电池重要性能的三相界面长度参数, 并利用格子 Boltzmann 方法在考虑三相界面长度情况下模拟了阳极内的气体扩散和极化损失, 模拟出燃料电池的性能, 构建燃料电池在不同使用条件下的三维结构变化与性能关系, 为燃料电池老化机理和电池结构优化提供理论基础。相关研究成果发表在 *Electrochimica Acta* 2014, 121, 386 - 393 上。

该成果发展了一种基于 X 射线成像无损研究燃料电池的有效三相界面长度, 基于该数据建立的物理模型, 在此基础上利用格子 Boltzmann 方法模拟电极内部反应气体扩散传输和浓差极化的变化, 其模拟结果比基于其它模拟结果精度高, 可定量分析燃料电池的性能。



不同热循环次数下阳极内部的氢气浓度分布。

设施建设、运行与改造

2014 年度合肥光源的主要目标是开展合肥光源总体性能调试, 全面达到合肥光源重大维修改造项目预定目标, 完成合肥光源重大维修改造项目的工艺测试, 具备向同步辐射用户供光的条件。

2014 年 1 月初取得环评许可证后, 合肥光源即开展总体性能调试。上半年进行了合肥光源注入器调试、储存环调试和插入元件调试, 至 2014 年 6 月, 合肥光源加速器初

步调试结束，除了束流寿命外，束流发射度、束流强度、轨道稳定性等主要指标都达到改造项目设计要求。2014年7月开始，合肥光源加速器开始与光束线站联合调试。2014年10月，加速器总体性能自测基本达标。2014年12月，光束线站性能自测达标。

2014年12月28-29日，合肥光源重大维修改造项目通过了中国科学院组织的工艺测试，合肥光源储存环、注入器及光束线站各项性能指标参数均达到或者优于设计目标。

2014年12月29日，合肥光源重大维修改造项目通过了中国科学院组织的工艺验收，标志着合肥光源具备了正式运行与开放的条件。

2014年度，实验室瞄准重大科研成果产出，对实验线站进行了梳理，认真分析每个线站的特点，明确每个线站的科学目标和发展方向。10月23-26日，成功举办“2014燃烧反应动力学用户培训班”，吸引了国内22家高校和科研院所的150余位师生参加，普及了燃烧反应动力学基础知识，提供了广阔自由的交流机会，对该领域科研工作者积极利用国家同步辐射实验室燃烧研究平台开展高水平研究工作起到了积极的推动作用。11月12日，面向校内科研人员成功召开同步辐射应用研讨会，介绍了即将投入运行的实验线站总体情况，听取了校内科学家对线站建设、实验技术发展的建议和需求，将有利于实验室建设高水平 and 科学生命力强的光束线站，进一步满足用户需求。

实验室2014年还进行了中英文网站和用户信息平台的改版及改版，其中新的中文网站已投入使用，起到了很好的宣传效果，与旧网站相比，内容更全面、信息更新更及时，真正成为用户实时了解实验室的窗口。

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		
171	122	29	20	69	55	47	30	23	251	10	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。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。2014年，博士后进站6名（目前实验室在岗聘期制科研人员20人）。

合作与交流

2014年，实验室积极邀请国外相关领域的著名专家来我室开展合作交流，与意大利、法国、德国等国的相关高校和研究机构建立了长期合作关系，逐步提高 NSRL 的国际影

响力。我室朱俊发教授及其合作伙伴德国专家 Jörg Michael Gottfried 获得中国科学院青年科学家国际合作伙伴奖。

本年度，实验室获批共计 4 个境外专家来访项目，其中包括 3 个国家外国专家局外国文教专家项目，1 个国家外国专家局高端外国专家项目，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。实验室超过 40 人次出访参加国际会议及进行合作交流。

2014 年，国家同步辐射实验室承办了全球华人物理和天文学会第八届加速器学校(7 月 27 日-8 月 6 日)，简称 OCPA 加速器学校。OCPA 加速器学校是由全球华人物理和天文学会主办的一个系列暑期学校，在亚洲地区每两年举办一次，从 1998 年创办至今已成功举办 7 届。十多年来，通过 OCPA 加速器学校的培养和选拔，涌现了一批目前活跃在国内外加速器领域的优秀人才。

大事记

1 月 8 日，直线加速器调束；

2 月 24 日，中科院詹文龙副院长一行莅临指导；

3 月 11 日，注入器束流能量达到 800MeV，储存环满能量注入；

5 月 17 日，举办 2014 年科技活动周活动；

7 月 27 日-8 月 6 日，举办“全球华人物理和天文学会第八届加速器学校”；

10 月 23-26 日，举办“2014 燃烧反应动力学用户培训班”；

11 月 12 日，召开“同步辐射应用研讨会”；

12 月 28-29 日，合肥光源重大维修改造项目通过中科院条件与保障局组织的工艺测试；

12 月 29 日，合肥光源重大维修改造项目通过中科院条件与保障局组织的工艺验收。

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