

超高分辨宽能段光电子实验系统 ——上海光源“梦之线”

中国科学院物理研究所

上海光源“梦之线（Dreamline）”——超高分辨宽能段光电子实验系统是上海光源的“亮点”实验线站。该线站是由中国科学院物理研究所、上海应用物理研究所和大连化学物理研究所在上海光源同步辐射装置上共同建造的具有超高能量分辨率和超宽能段的光束线—光电子能谱—光电子显微镜双实验站的实验系统。该系统具有多项国际领先的设备指标和独特的设计，是目前世界上性能最好的光电子实验系统之一，建成后取得了多项具有重要国际影响力的科研成果。“梦之线”的建设经费由国家财政部支持，项目建设时间为5年，已于2015年6月通过验收并投入使用。

建设背景

近几十年来，随着同步辐射及相关技术的不断发展，利用同步辐射光源建立适应不同科学研究与技术发展需求的实验站，为相关前沿科学与技术研究领域提供关键的实验支撑已成为国际科学技术发展的一种重要模式。依靠同步辐射光源进行科学研究的成果产出是与多方面因素紧密相连的，而且各方面因素相互间的促进作用不是简单的“加和”关系，而是具有倍增效果的“乘积”关系，可用一个简单的表达式来定性的表示其间的关系：

$$\text{科技成果产出} = \text{同步光源} \times \text{光束线} \times \text{实验站} \times \text{样品} \times \text{科学家能力}$$

2009年初在考虑“梦之线”的建设时，上海光源是世界上最先进的光源之一。当时，在样品的制备技术和科学家的能力方面我国许多领域的科学家已走在了世界的前列。例如，在2008年初开始的新一轮全球对铁基超导体研究热浪中，我国科学家在材料的制备和研究方面显示了卓越的能力，做出了许多重要的贡献，受到了国际科技界的充分肯定；但同时也暴露出了我们在研究手段，尤其是依靠同步辐射装置及光电子能谱（被称为高温超导研究的首选工具）开展关键性的超导材料电子结构研究方面的“短板”——国内科学家的许多重要实验不得不将样品寄给国外合作伙伴或科学家到国外的同步辐射实验站上做实验（因各种原因，能得到这样机会的很少）。这种局面为科学实验结果的顺利取得、赢得取得成果的时间、知识产权等方面带来了一系列的不利影响，突出地反应了我国高端光束线站的缺乏和对其建设需求的紧迫性。

“梦之线”正是在这种建设背景下提出了其建设目标：在上海光源建设一个世界上最先进的同步辐射光束线—光电子实验系统，为我国在利用同步辐射光源开展光电子能谱和光电子显微相关研究领域的科学家们获得

执笔人：丁洪，吴奇，黄耀波，钱天

更多、质量更高且具有独立知识产权的原创性重大科研成果提供功能强大的光电子实验手段。

设备特点及创新性

1887年德国物理学家赫兹发现了光电效应，即一束光照射在样品表面，当入射光频率高于特定阈值（功函数）时，表面附近的电子会脱离样品，成为自由电子。角分辨光电子能谱（angle resolved photoemission spectroscopy, ARPES）是利用光电效应研究固体在动量空间电子结构的实验室手段，而光电子显微镜（photoemission electron microscopy, PEEM）是利用光电效应研究固体在实空间的微观组织结构和磁结构的实验手段。“梦之线”将这两种实验手段相结合，实现了对同一样品在动量空间和实空间、从真空紫外到软X射线能量范围的全面、精确的“原位”测量。这种先进的组合光电子实验系统，能够完成许多以前无法完成的重要科学实验（因而，该项目的首席科学家丁洪研究员将其命名为“梦之线”）。例如，可全面（从价带谱到芯能级）、有效地研究奇异超导体（高温超导体、重费米子超导体、有机超导体等）和新型量子材料（巨磁阻材料、自旋电子材料、拓扑绝缘体等），为这些物质宏观量子效应产生机理的破解提供最详实而充分的实验依据。直到目前为止，国内尚无此类装置，国际上类似的科学研究主要是在很少的几个性能低于“梦之线”设计的同类装置上进行。

“梦之线”具有多项自主创新的技术和一流的设计，许多关键部件（包括双插入件）的设计和制造均由国内研发力量完成（图1）。项目在光学器件的加工难度、机械精度和稳定性方面都具有挑战性，其成功研制对提高我国高端光束线和实验站的设计与建设能力、增强我国先进科学仪器的自主创新能力具有重大战略意义。“梦之线”在设计上的主要创新点包括：①采用实验站双站连接的创新性设计，实现对同一样品在实空间和动量空间（正空间和倒易空间）、在真空紫

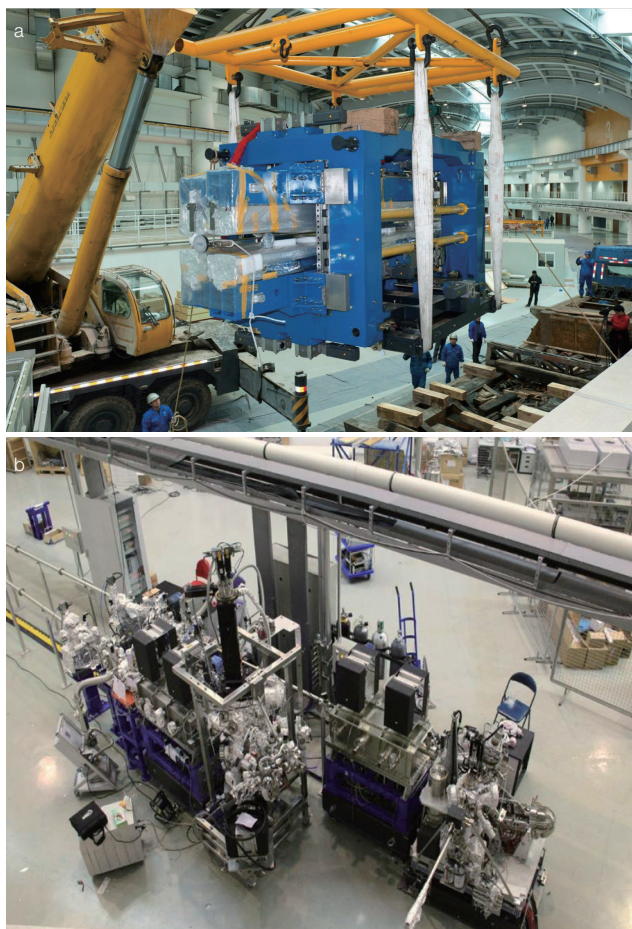


图1 上海光源“梦之线”

（a）“梦之线”双插入件运抵实验大厅；（b）角分辨光电子能谱和光电子显微镜实验站

外和软X射线范围内的全面、精确的ARPES-PEEM原位测量；②国际首次采用平行双插入件，实现超宽能段（20—200 eV，200—2000 eV）；③实现光束线的超高分辨率（25 meV@1000 eV或更好，优于世界纪录50 meV），进而实现光电子能谱仪的超高能量分辨率（2 meV@20 eV，25 meV@1000 eV或更好）和光电子显微镜的超高空间分辨率（不低于25 nm），创造软X射线分辨率的世界最高记录。

“梦之线”的建成和使用对我国相关科学前沿问题探索和科研设备的技术进步具有重要意义，其不仅能对若干科学难题的破解起到直接或重要促进作用，而且将我国光电子能谱和光电子显微镜这两大光电子实验手段提升到世界一流水平。此外，最大限度地利用了上海光

源的先进指标，如它的超低发射度等，对上海光源后续实验线站的建设具有重要示范作用。

“梦之线”取得的代表性科研成果

固体材料中的奇异费米子

现有理论认为宇宙中可能存在狄拉克、外尔和马约拉纳3种费米基本粒子。近年来，固体能带理论指出，一些固体材料中电子的集体激发产生的准粒子，也可以被标准模型描述，与宇宙中的费米基本粒子对应。此外，由于空间对称性的降低，固体材料中可能存在超出这3类费米子的非传统费米子。2014年底，上海光源“梦之线”通过技术验收之后，中国科学院物理研究所（以下简称“中科院物理所”）丁洪、钱天等人组成的实验团队在“梦之线”上对一系列拓扑材料的电子结构进行研究，实验证实了多种奇异费米子。

（1）在 TaAs 单晶样品（001）表面，观测到外尔半金属特征的非闭合费米弧表面态，提供了 TaAs 外尔电子态的关键证据，实验上首次在固体材料中证实了外尔费米子的存在（图2）。该结果发表在 *Physical Review X*，该论文入选2015年“中国百篇最具影响国际学术论文”，截至2018年6月已被引用768次（Web of Science 数据），是 *Physical Review X* 杂志2011年创刊以来被引用次数最多的论文。入选欧洲物理学会评选的2015年度物理学十大突破、美国物理学会评选的2015年物理学八大亮点工作、2015年中国十大科技进展新闻、2015年中国科学十大进展、2018年美国物理学会 *Physical Review* 系列期刊创刊125周年精选论文集。

（2）首次测量了非简单空间群拓扑绝缘体，在 KHgSb(010)表面态观测到沙漏费米子，该结果发表在 *Science Advances*。

（3）利用上海光源“梦之线”独特的超宽光子能量波段，在软X射线入射光下观测到 MoP 单晶体态能带中存在三重简并点，首次在固体材料中实验证实了超出

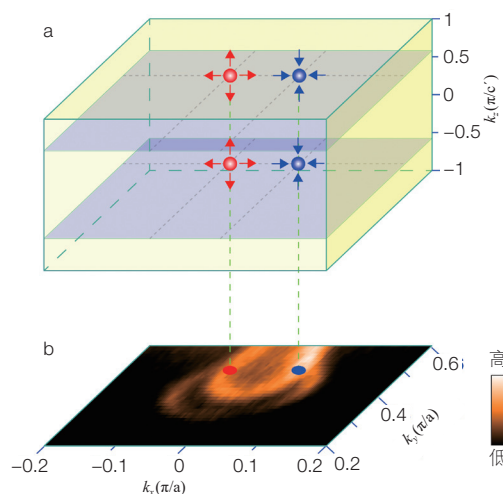


图2 TaAs 体态外尔点 (a) 投影到表面态费米弧的两端 (b)

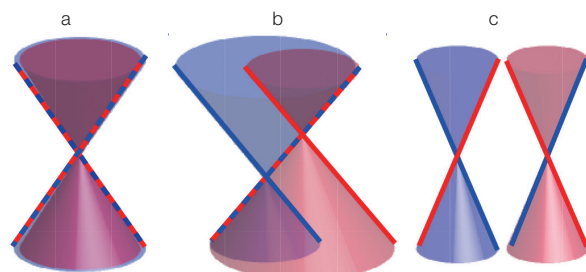


图3 四重简并狄拉克费米子 (a)、三重简并非传统费米子 (b) 和两重简并外尔费米子 (c) 示意图

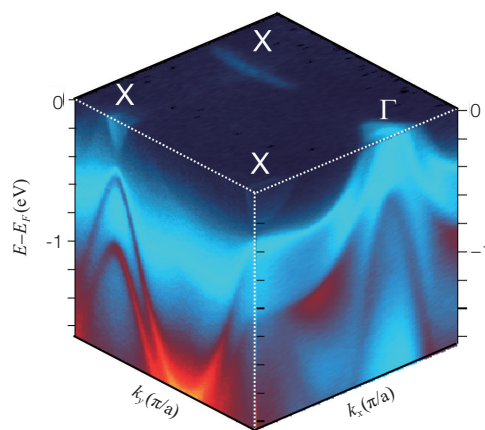


图4 大磁阻材料 LaSb 电子结构

传统分类的新型费米子——三重简并费米子（图3），该结果发表在 *Nature*。随后，他们又对相同晶体结构的 WC 单晶进行测量，观测到表面态费米弧，证实了三重简并半金属态的拓扑非平庸性质，该结果发表在 *Nature Physics*。

超大磁阻材料LaSb电子结构研究

近年来,人们在许多非磁性半导体中观察到极端巨大的正磁阻(XMR),普遍认为这些材料中XMR与电子结构有密切联系。中国人民大学王善才教授和中科院物理所雒建林研究员、钱天研究员合作,在上海光源“梦之线”对XMR半金属LaSb的电子结构进行了细致的研究,确定了载流子补偿和能带的拓扑平庸的性质,并基于电子结构建立了三带模型解释了其XMR行为(图4)。该结果发表在*Physical Review Letters*。

光电子显微镜辅助实现石墨烯快速生长

石墨烯以其优异的电导、热导、透光性和高强度,具有替代硅成为生产透明电子器件的潜在应用价值,然而实现其高质量快速生长仍然是一个挑战。中国科学院上海微系统与信息技术研究所谢晓明团队利用可溶碳的 $\text{Cu}_{85}\text{Ni}_{15}$ 作基底提供局部碳浓度过饱和,在国际上首次实现了石墨烯单核控制形核和快速生长,成功研制~1.5英寸石墨烯单晶(图5);随后,该研究组又采用铜蒸气辅助,克服了传统生长方式下薄膜层数不均、晶核大小难以控制等难题,将AB堆垛双层石墨烯(ABBG)的生长速度提高了1个量级。在研制过程中,该团队利用“梦之线”上目前国内唯一的同步辐射XPEEM,对合成的单层和双层石墨烯进行表面形貌和结构的纳米级分辨率标定,实验证明了采用快速生长方法合成的石墨烯具有高质量单晶性和严格一致的晶体取向(图6)。这一系列研究为合成其他二维材料单晶晶圆和ABBG类材料提供了全新的思路,具有重要的应用价值。

实现准一维周期势调控石墨烯能带结构

对于石墨烯材料,研究对它的能带的调控是实现其实际应用需要解决的核心问题之一。理论预言,一维或二维周期性重构可引起载流子群速的改变从而使石墨烯产生新的狄拉克点,导致磁性、超导等新奇性质,而通过实现石墨烯与其他材料的异质结构是实现一维或二维

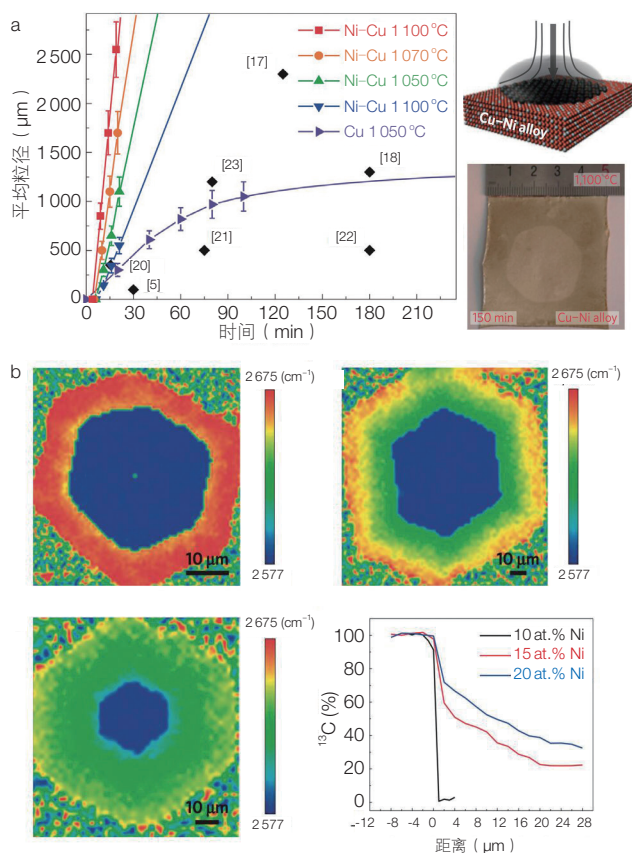


图5 Ni-Cu合金表面快速生长晶圆级石墨烯单晶(a)和同位素技术对合金衬底上石墨烯生长机理的分析(b)

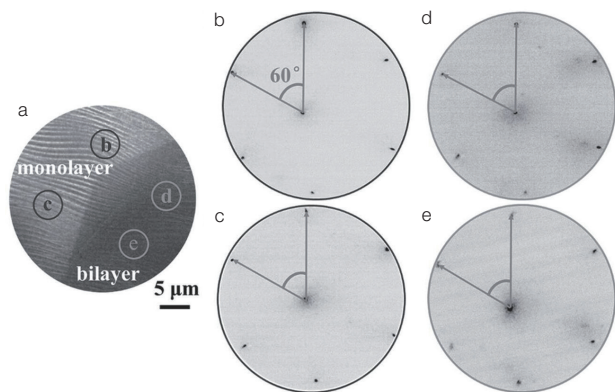


图6 “梦之线”XPEEM测量的ABBG石墨烯的LEEM (a)浅色区域为单层石墨,深色区域为双层石墨区;(b)——(e)对应于图a中字母区域的石墨烯LEED图;数据显示了两层单晶相石墨烯在晶格上的精确匹配。

周期性重构的有效途径。北京大学的张艳峰和吴孝松团队利用Au(001)表层原子在特定温度下实现六方重构,对生长在此表面的石墨烯形成准一维条纹的超晶格点阵调制。该团队利用“梦之线”的ARPES和XPEEM实验站,研究Au(001)超晶格上生长的石墨烯的电子结

构、表面形貌和化学成分，以及确认表面重构的周期性（图7），为准一维周期性调制实现石墨烯的电学性质

改变提供了实验证据。该研究对石墨烯的理论研究与实际应用都具有重要意义。

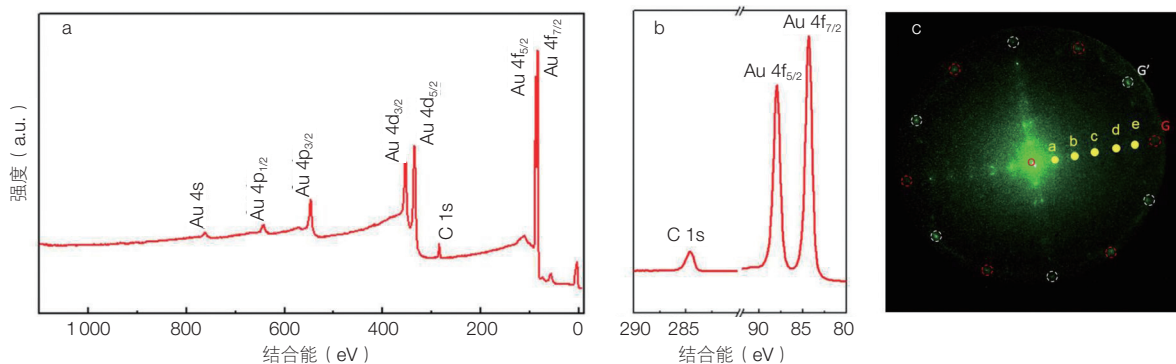


图7 利用“梦之线”测得的 Au(001) 面上石墨烯光电子谱和 LEED

(a) 和 (b) 中显示了尖锐的金原子和石墨烯的特征峰；(c) LEED 图显示了 Au(001) 重构衬底上的六重对称性

专家点评

“梦之线”是由中国科学院物理研究所、上海应用物理研究所和大连化学物理研究所在上海光源同步辐射装置上共同承担建造的光束线与实验站装置。基于光束线超高能量分辨率和超宽能段，建成的光电子能谱和光电子显微镜双实验站系统具有独特的设计理念和多项国际领先的设备指标，是目前世界上性能指标最高的光电子实验系统之一。投入运行以来实验发现了外尔半金属，证实了三重简并费米子及在石墨烯研究方面取得重要突破。这些重大成果均发表在国际顶尖科学杂志上。“梦之线”具有“科学目标的起点高、设备的技术指标高、科学产出的水平高”的特点，其建成不仅提升了我国利用光电子实验设备开展重大科学研究的实力，而且为我国尖端科研设备的协同研制积累了经验。

——奎热西·依布拉欣，中国科学院高能物理研究所研究员